

中国草地生态系统根系周转的空间格局和驱动因子

孙元丰^{1,2} 万宏伟¹ 赵玉金¹ 陈世苹^{1,2} 白永飞^{1,2*}

¹中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ²中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要 根系周转是陆地生态系统物质循环的关键指标, 也是陆地生态系统净初级生产力及碳固持潜力估算的核心参数。然而, 由于地下净初级生产力数据获取困难, 区域和全球尺度上的相关研究十分有限, 尤其是分布广泛的中国草地, 区域尺度上的整合研究几乎为空白。基于样地实测数据、已发表文献和在线数据库数据, 对中国草地5种植被类型、共计154个草地生态系统根系周转的空间格局进行整合分析, 并结合气象和土壤数据, 揭示了草地生态系统根系周转的关键驱动因子。研究发现: (1)根系周转速率随纬度升高而降低, 低纬度温暖地区根系周转更快; (2)气候因子(年平均气温、年降水量)和土壤理化性质(砾石含量、容重、pH值)共同影响根系周转, 对周转变异性的解释度为44%, 其中气候因子的相对贡献率为57%, 土壤理化性质的相对贡献率为43%; (3)中国草地根系周转的格局和驱动因子与全球尺度的研究结果不尽相同。该研究对根系周转的驱动因子提出了新的观点和证据, 为全球尺度上的整合研究提供了关键数据。

关键词 根系周转; 中国草地; 气候因子; 土壤属性; 相对贡献; 气候变化

孙元丰, 万宏伟, 赵玉金, 陈世苹, 白永飞 (2018). 中国草地生态系统根系周转的空间格局和驱动因子. 植物生态学报, 42, 337–348. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0241

Spatial patterns and drivers of root turnover in grassland ecosystems in China

SUN Yuan-Feng^{1,2}, WAN Hong-Wei¹, ZHAO Yu-Jin¹, CHEN Shi-Ping^{1,2}, and BAI Yong-Fei^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and ²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Root turnover rate is a key indicator of ecosystem functions and services. It is also a core parameter for estimating net primary productivity and carbon sequestration potential. However, few studies have examined the patterns and drivers of root turnover at regional and global scales, especially for the widely distributed grassland ecosystems in China. Our objective is to determine: 1) the spatial patterns of root turnover rate for grassland ecosystems in China; and 2) the mechanisms and relative contributions of abiotic and biotic factors driving the root turnover process.

Methods Root turnover data used in this study were derived from two sources. One was obtained from the sample-to-sample plot survey by Grassland Carbon Sequestration Project. The other was extracted from 43 published literatures on root turnover of grasslands in China from 1983 to 2016. These publications were collected from the ISI Web of Science or Chinese literature database. For studies in which climatic variables were not reported, climate information was extracted from the World Climate Database based on site coordinates. Soil properties were collected from Harmonized World Soil Database Version 1.1 supplied by Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Important findings Our results showed that root turnover rate was significantly negatively correlated with latitude in China. The national scale pattern of root turnover was influenced by climatic variables (mean annual temperature and mean annual precipitation) and soil properties (gravel content, bulk density, and pH value). These variables together explained 44% of the variation in root turnover rate, with the relative contribution being 57% for climatic variables and 43% for soil properties. However, the regional scale patterns and drivers of root turnover for grasslands in China were different from those at the global scale.

Key words root turnover; grassland in China; climatic factors; soil properties; relative contribution; climate change

收稿日期Received: 2017-09-13 接受日期Accepted: 2018-01-24

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFA06047020)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050400)。Supported by the National Key Point Research and Invention Program (2017YFA06047020) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050400).

* 通信作者Corresponding author (yfbai@ibcas.ac.cn)

Sun YF, Wan HW, Zhao YJ, Chen SP, Bai YF (2018). Spatial patterns and drivers of root turnover in grassland ecosystems in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 337–348. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0241

根系作为植物体的重要器官,能够吸收水分和营养物质并储存光合产物,同时根系的凋亡也是土壤有机质的主要来源,因此根系是联系植物地上部分和土壤的重要媒介。根系周转是指根系从产生到死亡并分解消失的过程。根系周转的快慢用根系周转速率来表征,它等于一年中生物量的增加值与最大值之比,单位为 a^{-1} (Dahlman & Kucera, 1965),周转速率越大表明周转越快,植物利用营养元素的能力就越强(宇万太和于永强, 2001)。通过根系周转,碳从植被流入土壤。研究表明,通过该过程进入土壤的碳占土壤总输入碳量的14%–50% (Vogt *et al.*, 1986),因此根系周转是陆地生态系统土壤碳汇的重要途径。同时,根系周转对全球变化关键驱动因子,如气候变暖、降水格局改变、 CO_2 浓度升高、土地覆盖变化等具有很强的敏感性(Gill & Jackson, 2000)。因此,研究根系周转格局及其影响因子是认识生态系统碳分配和养分循环的关键(Jackson *et al.*, 1997; Clark *et al.*, 2001; Trumbore & Gaudinski, 2003),也是正确理解陆地生态系统如何响应全球变化的基础(Tom *et al.*, 1997; 贺金生等, 2004; 王妮等, 2008)。

草地占地球陆地总面积的40.5% (不包括格陵兰岛和南极)(White *et al.*, 2000),在全球碳循环中发挥着重要作用。对草地生态系统而言,地下生物量占很大比重(贺金生等, 2004)。对内蒙古羊草(*Leymus chinensis*)草原和大针茅(*Stipa grandis*)草原的生物量研究表明,地下生物量分别占植物全部生物量的81%和73% (姜恕等, 1985)。因此,研究根系周转对深入理解草原生态系统碳库动态和固碳速率与潜力具有重要意义(柴曦等, 2014)。

对于草地生态系统,周转的概念最早是由Odum (1960)在研究弃耕地生态系统的演替时提出的。Odum (1960)对研究区的植物总生产力进行了系统分析,而未对植物的地上部分和根系加以区分,也没有提出周转速率的计算方法。直到1965年,美国密苏里大学的Dahlman和Kucera (1965)在研究草地根系周转时,提出了后来被广泛应用的根系周转速率计算方法,即根系周转速率=净地下初级生产力(BNPP)/地下生物量最大值(BGB_{max})。在此后的几十年间,Shaver和Billings (1975)对阿拉斯加湿润苔

原的根系周转进行了测定。Gupta和Singh (1982)研究了物种组成对热带草原根系周转的影响。Milchunas等(1985)首次使用 ^{14}C 稀释技术测定了格兰马草(*Bouteloua gracilis*)的根系周转速率。Hayes和Seastedt (1987)研究了水分对北美高草草原的根系周转的影响。Fitter等(1997)研究了 CO_2 浓度升高对根系周转的影响。然而,由于植物地下部分取样难度大等原因,关于根系周转的研究进展缓慢(Milchunas, 2009),且多集中于局地尺度,对根系周转在区域甚至全球尺度上的格局没有明确的认识。直到2000年, Gill和Jackson (2000)收集了在此之前发表的文献中的根系周转数据,首次从全球尺度上分析了主要生态系统类型(森林、草地、灌丛、湿地)根系周转的格局和主要驱动因子。其中草地生态系统包含79组数据,研究表明全球草地生态系统根系周转速率随年平均气温(MAT)呈指数增加,而与平均年降水量(MAP)没有显著的相关关系。在局地尺度上,通过对北美中部大平原14年的数据分析发现,根系周转速率与生长季降水/最热月气温的比值呈显著正相关关系,而与 MAT 及 MAP 均没有显著的相关关系(Gill & Jackson, 2000)。Gill和Jackson (2000)首次在全球尺度上整合已有的研究结果,揭示根系周转的格局及主要驱动因子,为之后的研究提供了重要思路。然而该研究也存在以下几方面的不足。首先,在样点的分布上,草地生态系统的样点主要分布在北美、非洲和印度,而全球最大的草地分布区欧亚大陆草原的样点却非常稀少,尤其是中国草地取样点数目为零。欧亚大陆草原独特的地理位置和气候条件决定了其异于北美和非洲草原的特性,因而该区域数据的缺失必将严重影响全球数据的代表性和结果的可靠性。其次, Gill和Jackson (2000)收集的数据库中,根系周转速率的计算除了传统的生物量法外,还包含了微根管法、同位素法及模型模拟的方法。不同方法所依据的原理不同,误差来源各异(Milchunas, 2009)。同一地点同一年份的数据,因为选用的方法不同,计算结果可能产生数量级的差异(Aber *et al.*, 1985)。所以方法上的不统一,也使得Gill和Jackson (2000)的研究结果存在很大的不确定性。另外,在该研究中,受数据提取途径的局限,根系周转驱动因子只包含了气候因子,而对于根系

生长的直接载体——土壤的理化性质并未考虑, 所以土壤数据的缺失是Gill和Jackson (2000)的研究中另一个不足之处, 也是我们着重改善的方向。

近年来, 随着技术的发展及研究草地生态系统根系周转意义的凸显, 相关研究逐渐增多。如Schippers和Olff (2000)研究了温室盆栽条件下, 3种不同养分水平对6种草本植物根系周转的影响, 发现根系周转对养分水平的响应不明显。Allard等(2005)对新西兰北部草地进行连续4年的CO₂气体施肥实验(free-air CO₂ enrichment), 结果表明, CO₂浓度升高可以加快根系周转。Volder等(2007)对澳大利亚水薹草(*Phalaris aquatica*)草地进行CO₂倍增、增温及刈割处理, 发现CO₂浓度升高对根系周转没有明显的影响, 而白天增温和刈割可以显著提高根系周转速率。Larreguy等(2012)对阿根廷Patagonian山地草原的研究发现, 放牧可以通过影响土壤水分加快根系周转。Leifeld等(2015)利用放射性同位素(¹⁴C)法对欧洲山地草原25个样地的研究表明, 根系周转随年平均气温的增加呈指数增长, 与Gill和Jackson (2000)的研究结果一致。Peng等(2017)对全球氮添加实验进行meta分析, 表明氮添加降低了草地生态系统根系周转速率。

关于中国草地根系周转的研究, 早在20世纪80年代已经开展, 根系周转速率的计算普遍采用根系周转速率=净地下初级生产力/地下生物量最大值(Dahlman & Kucera, 1965)。地下净初级生产力和地下生物量最大值主要通过生长季群落地下生物量的月动态进行测定获取, 取样方法主要采用土柱法。生长季群落地下生物量最大值即为地下生物量最大值, 群落地下生物量最大值和最小值之差即为地下净初级生产力。基于上述方法, 陈佐忠和黄德华(1988)对内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下部分生产力和根系周转速率进行了测定, 发现不同年份周转速率变化很大, 主要与降水有关。冯雨峰(1990)对内蒙古灌丛化石生针茅荒漠草原地下生产力和周转速率进行研究, 结果表明群落地下部分周转率在不同层次间存在很大差异, 水分条件是影响周转率的关键因素。李英年(1998)研究了海北高寒草甸生态系统的根系周转气候的关系, 发现在降水和气温较高的年份植物地下生物量周转速率也较高。除了直接针对根系周转速率的研究外, 一些关于地下生物量及地下净初级生产力的研究也为

根系周转速率的计算提供了数据支持。Ni (2004)整合了2000年以前发表的有关中国北方温性草地生物量或净初级生产力的文献, 从中提取到72组包含地下生物量或地下净初级生产力的数据, 发现群落净地下初级生产力与夏季(5–9月)平均气温呈显著的负相关关系。该项工作为进一步研究根系周转提供了基础, 同时Ni (2004)也指出, 2000年以前中国学者对于草地的研究成果大多发表在中文期刊上, 西方学者由于语言上的障碍, 无法将这部分优秀成果整合到全球尺度的研究中去。进入2000年以后, 关于中国草地生态系统根系周转的研究逐渐增多, 方法也呈现多样化, 且逐渐由自然条件下的取样监测转向野外控制实验研究。王长庭等(2003)对高寒矮生嵩草(*Kobresia humilis*)草甸净初级生产力沿降雨及海拔梯度的分布规律进行了一系列研究。Bai等(2008)利用微根管法研究了氮添加对内蒙古典型草原羊草群落根系寿命的影响, 结果表明, 氮添加可以明显缩短夏季出生的羊草根寿命。Bai等(2010)进一步研究了增温和增雨对内蒙古温性草地根系周转速率的影响, 发现增温对根系周转没有明显影响, 而增雨可以显著提高根系周转速率。吴伊波等(2014)探讨了不同取样方法(根钻法、内生长袋法及微根管法)对根系周转速率测定结果的影响, 发现不同方法测定结果间存在较大差异。应当指出, 随着不同草地类型相关研究的进展, 整合已有的结果, 进行根系周转速率的大尺度空间格局和驱动因子的分析, 以期获得更宏观的认识显得尤为迫切。

中国是世界草地资源大国, 拥有草地总面积近4亿hm², 草地面积约占国土总面积的41.7% (中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站, 1996)。因此, 开展中国草地根系周转的整合分析, 对于揭示我国草地生态系统的碳循环特征, 准确评估草地的固碳速率和潜力具有十分重要的理论和现实意义。为此, 本文以中国草地生态系统为研究对象, 通过对已发表的研究论文和专著中有关根系周转的数据收集、整理和系统分析, 结合实测数据, 研究根系周转的空间格局及其与气候因子和土壤属性之间的关系。拟回答以下两方面的科学问题: 1)中国草地根系周转呈现出什么样的空间分布格局? 该格局与全球尺度的草地根系周转格局有何异同? 2)影响中国草地根系周转的主要气候因子和土壤属性有哪些? 影响机制是什么? 各个因子的相对贡献有多大?

1 材料和方法

1.1 数据筛选标准

为了避免不同测定方法的差异带来的影响,本研究统一使用生物量法来计算根系周转速率,对使用微根管法、同位素法或模型模拟方法获得的数据予以剔除。具体计算公式为:根系周转速率=地下净初级生产力(*BNPP*)/地下生物量最大值(*BGB_{max}*),单位为 a^{-1} (Dahlman & Kucera, 1965)。在数据收集过程中,如果文献直接提供根系周转速率,且计算方法与前述方法一致,则予以采用;反之,如果文献中没有直接给出根系周转速率,则需要包含完整的*BNPP*及*BGB_{max}*数据,或者根据*BGB*的季节动态从中提取出*BGB_{max}*进而代入公式计算。另外,同一地点不同年份的数据视作独立的数据参与计算。根系取样方法为土柱法、壕沟法、根钻法或内生袋法等传统取样方法,*BNPP*的计算方法为极差法、矩阵法或积分法(吴伊波等, 2014)。

1.2 数据获取途径及收集结果

根系周转数据主要来源于已发表的期刊论文、专著等文献提取数据和实测数据。前者主要通过ISI Web of Science (<http://www.isiknowledge.com/>)和中国知网数据库(<http://www.cnki.net/>),输入“草地(grassland)”、“地下净初级生产力(*BNPP*)”及“根系周转(root turnover)”为关键词进行检索,基于前述筛选标准,从1985–2016年间发表的45篇文献(附录I)中获得107组符合条件的数据。若文献中的数据以图表的形式呈现,则通过Engauge_Digitizer_4.1 (<http://engauge-digitizer.soft112.com/>)图形数字化软件提取。具体的数据提取过程如下:1)导入目标曲线图,或者直接拖动曲线图将其拷贝到工作区界面中;2)定坐标轴,分别在坐标轴原点、*x*轴最大值和*y*轴最大值处点击,在弹出的对话框中输入该点的坐标值;3)在目标曲线上逐个描点;4)把描出的点数据导出并保存。实测部分来源于中国科学院战略性先导科技专项第三课题“草地生态系统固碳现状、速率、潜力与机制”2011–2013年对中国主要草地分布区的调查数据,地下生物量和地下净初级生产力分别采用根钻法和内生长芯法测定,该部分共47组数据。

气候因子(*MAT*、*MAP*)数据如果文献中未提供,则基于所在样地的经纬度信息从世界气象数据库(www.worldclim.org)中提取,精度为30角秒(arc-sec-

onds)。土壤理化性质数据全部来自于表层土壤(0–30 cm),包含土壤质地、排水等级、砾石含量、黏粒含量、砂粒含量、有机碳(SOC)含量、容重(BD)、酸碱度(pH值)、阳离子交换量(CEC)。土壤数据全部基于样地经纬度从联合国粮食及农业组织(FAO)的归一化土壤数据库(Harmonized World Soil Database Version1.1) (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/luc07/External-World-soil-database/HTML/index.html?sb=1>)中提取。

1.3 数据分析

所有数据分析均在R语言软件中进行(R version 3.3.3 by R Development Core Team 2017)。数据分布的正态性检验采用Kolmogorov-Smirnov检验,符合正态分布($D > 0.05$, $p > 0.05$),无需对数转换。不同草地类型、土壤质地及排水等级下根系周转速率的差异采用非平衡单因素方差分析和最小显著差异(LSD)多重比较方法。根系周转速率与气候因子及土壤理化性质的相关性分析采用Pearson相关分析方法,通过R语言中psych包中的corr.test函数实现。气候因子与根系周转速率之间的关系采用一元线性回归分析,气候因子和土壤理化性质对根系周转速率的综合影响采用全子集回归法筛选最佳多元回归模型,通过leaps包中的regsubsets函数实现。因子间的多重共线性采用方差膨胀因子(vif)进行检验,各因子的相对贡献率用R语言软件提供的自定义函数relweights计算。图形绘制通过SigmaPlot 11.0完成。

2 结果和分析

2.1 根系周转在空间上的分布

调查样地介于27.79° N与49.35° N之间,取样点基本涵盖了中国草地的主要分布区(图1)。沿纬度梯度,根系周转速率与纬度高低呈显著负相关关系($p < 0.001$)(图2)。低纬度地区即南方热性草丛区,根系周转较快,相反,北方干旱半干旱典型草原区根系周转相对较慢。

2.2 不同草地类型根系周转

基于Zhu (1993)对中国草地的分类标准,将研究区草原分为5类,分别为高寒草甸、典型草原、草甸草原、荒漠草原和热性草丛。各草地类型的根系周转速率分布情况如图3,除了高寒草甸、典型草原的根系周转速率存在离散点外,其他类别数据分布相对集中。热性草丛的平均根系周转速率最高,其

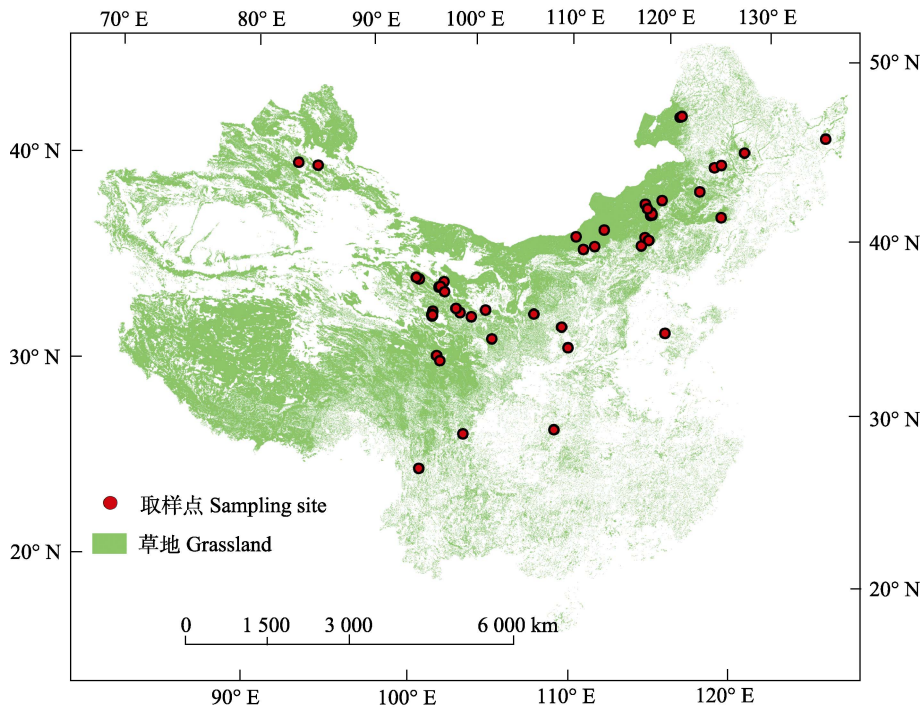


图1 取样点分布。
Fig. 1 Distribution of the study sites.

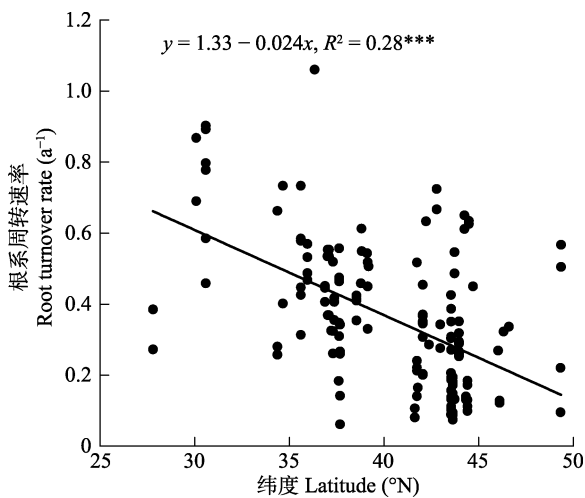


图2 根系周转速率随纬度的分布格局。
Fig. 2 Patterns of root turnover rate with increasing latitude.

次是高寒草甸、草甸草原、荒漠草原、最低的是典型草原, 平均值为 $0.246 \cdot a^{-1}$, 即典型草原群落水平上根系平均每5年左右周转一次。不同草地类型之间根系周转速率存在显著差异($p < 0.001$)(图4)。

2.3 根系周转与气候因子及土壤理化性质之间的关系

根系周转受多个因子影响, 与年平均气温(MAT)、年降水量(MAP)及土壤砾石含量呈显著正相关关系, 而与土壤容重(BD)、pH值及阳离子交换量

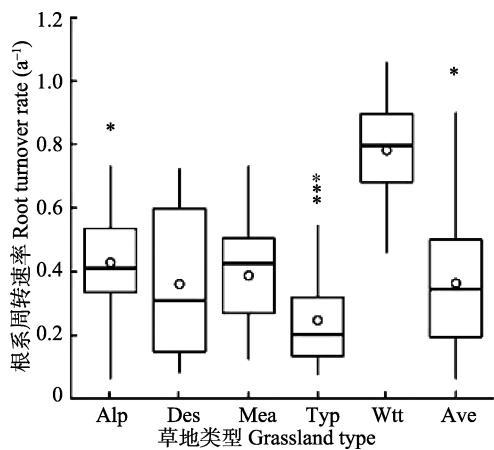


图3 不同草地类型根系周转速率分布情况。矩形的上端和下端分别代表第四分位数和第一分位数, 横线代表中位数, 空心圆点代表均值, 实心点代表离散点。Alp, 高寒草甸; Ave, 平均值; Des, 荒漠草原; Mea, 草甸草原; Typ, 典型草原; Wtt, 热性草丛。

Fig. 3 Changes in root turnover rate among grassland types in China. The boxes show the 25% and 75% percentiles, and the lines, hollow dots and solid dots represent the mean, median and outlier (95% confidence interval) values, respectively. Alp, alpine meadow; Ave, average value; Des, desert steppe; Mea, meadow steppe; Typ, typical steppe; Wtt, warm-temperate tussock;.

(CEC)呈负相关关系(表1)。研究区覆盖的MAT范围为 $-3.2 \sim 12.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 在该温度范围内, 根系周转速率随MAT的增加呈线性增加($R^2 = 0.21, p < 0.001$; 图5A), MAP则介于 $104 \sim 1408 \text{ mm}$ 之间, 根系周转速率随

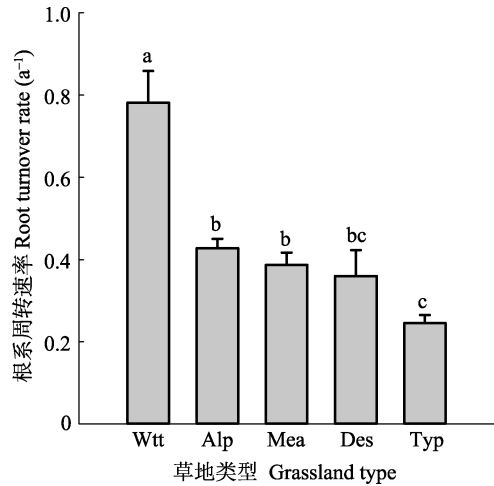


图4 不同草地类型根系周转速率(平均值+标准误差)。不同小写字母表示类型间差异显著($p < 0.05$)。Alp, 高寒草甸; Des, 荒漠草原; Mea, 草甸草原; Typ, 典型草原; Wtt, 热性草丛。

Fig. 4 Root turnover rate for different grassland types (mean + SE). Different lower-case letters indicate significant differences among grassland types ($p < 0.05$). Alp, alpine meadow; Des, desert steppe; Mea, meadow steppe; Typ, typical steppe; Wtt, warm-temperate tussock.

MAP 的增加也呈线性增加($R^2 = 0.21, p < 0.001$; 图5B)。在土壤理化性质方面, 根系周转速率随砾石含量的增加呈线性增加($R^2 = 0.15, p < 0.001$; 图6A), 随土壤容重的增加呈线性减小($R^2 = 0.11, p < 0.001$; 图6B), 随阳离子交换量的增加呈线性增加($R^2 = 0.10, p < 0.001$; 图6D), 根系周转速率与土壤pH值间存在弱的线性负相关关系($R^2 = 0.03, p < 0.05$; 图6C)。在土壤质地方面, 根据不同土壤粒径所占百分比大小, 土壤质地分为3类: 粗质(砂粒 $>65\%$, 黏粒 $<18\%$)、中等(砂粒 $\leq 65\%$, $18\% \leq$ 黏粒 $\leq 35\%$)、细质(黏粒 $>35\%$), 不同土壤质地间根系周转速率有显著

表1 不同草地类型根系周转速率统计

Table 1 Statistics of root turnover rate in different grassland types

草地类型 Grassland type	样本数 N	平均值 Mean	标准误差 SE
高寒草甸 Alpine meadow	47	0.428	0.022
荒漠草原 Desert steppe	14	0.360	0.063
草甸草原 Meadow steppe	29	0.387	0.030
典型草原 Typical steppe	57	0.246	0.019
热性草丛 Warm-temperate tussock	7	0.782	0.077

差异(图7), 细质土和中等土根系周转速率较高, 粗质土根系周转速率最低。在土壤排水性方面, 随着排水能力提高, 根系周转速率呈现出先增大后减小的趋势(图8)。

影响根系周转的部分因子之间存在自相关, 如 MAT 与 MAP ($r = 0.5, p < 0.001$; 表2), 为此, 我们在进行多元线性回归分析之前, 对各因子间的多重共线性进行检验(附录II), 方差膨胀因子 $vif < 4$, 表明各变量之间不存在多重共线性。进一步对根系周转速率6类影响因子(MAT 、 MAP 、 $Gravel$ 、 BD 、 pH 和 CEC)进行全子集回归(附录III), 结果表明包含全部5个变量(MAT 、 MAP 、 BD 、 $Gravel$ 、 pH 和 CEC)的回归模型为最佳模型, 对根系周转速率的解释度为44% ($R^2 = 0.44$), 各因子对根系周转速率解释度的相对贡献(%)由高到低依次是 MAT (34.4)、 MAP (22.2)、 BD (19.4)、 $Gravel$ (17.1)、 pH (6.9) (图9)。

3 讨论

3.1 气候因子对根系周转的影响机制

根系周转速率随 MAT 的增加呈线性增加, 即南方温暖地区根系周转要比北方寒冷地区快, 可能有

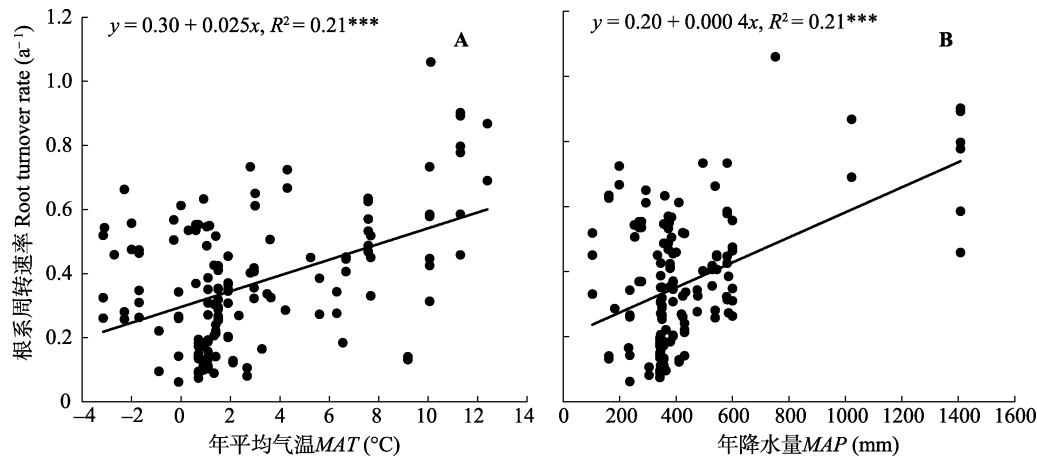


图5 根系周转速率和年平均气温(MAT) (A)及平均年降水量(MAP) (B)之间的关系。

Fig. 5 Relationship between root turnover rate and mean annual temperature (MAT) (A) and mean annual precipitation (MAP) (B).

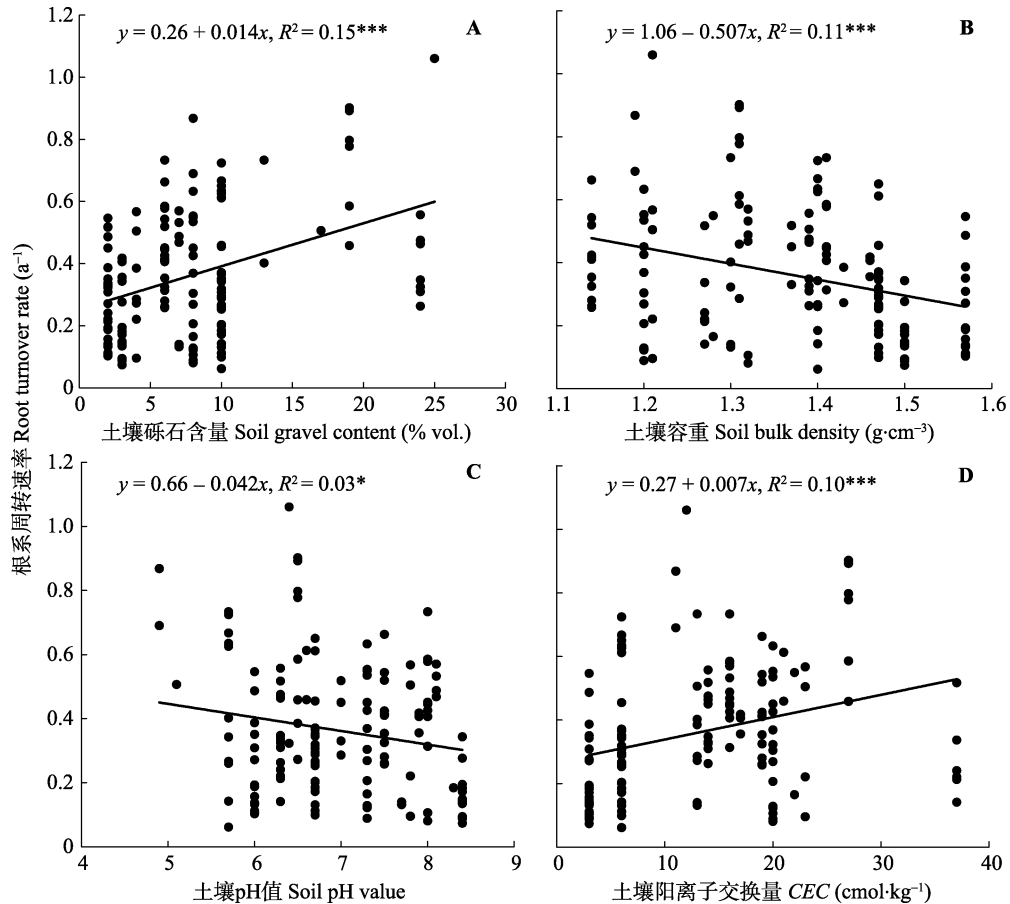


图6 根系周转速率和土壤砾石含量(A)、容重(B)、pH值(C)及阳离子交换量(D)之间的关系。
Fig. 6 Relationships between root turnover rate and soil gravel content (A), bulk density (B), pH value (C) and cation exchange capacity (CEC) (D).

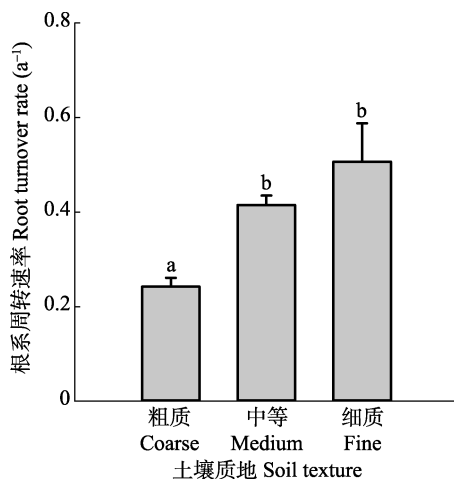


图7 根系周转速率和土壤质地之间的关系(平均值+标准误差)。
Fig. 7 Relationship between root turnover rate and soil texture (mean + SE).

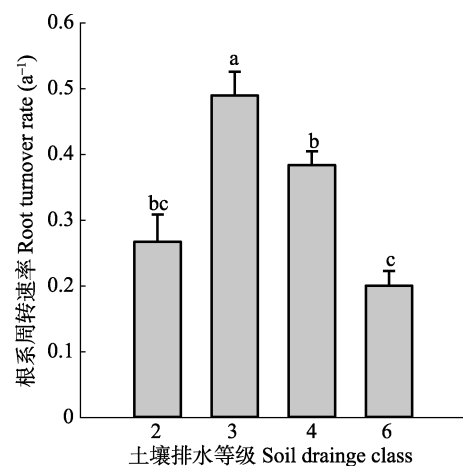


图8 根系周转速率和土壤排水等级之间的关系(平均值+标准误差)。
Fig. 8 Relationship between root turnover rate and soil drainage class (mean + SE).

以下三方面的原因: (1)正常活细胞的细胞膜内外需要维持一定的离子浓度差, 并且更换已降解的蛋白, 而这些支持和修复功能需要借助维持呼吸来提供

ATP, 随着温度的升高, 蛋白质及细胞膜脂的更新加快, 需要更强的呼吸作用来维持(de Vries, 1975), 使得根系生物量的消耗速率提高, 因而加快了根系

表2 根系周转速率与气候因子和土壤理化性质之间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of the root turnover rate with climatic factors and soil properties

	气候因子 Climatic factor		土壤理化性质 Soil properties			
	MAT	MAP	Gravel	BD	pH	CEC
MAP	0.50***					
Gravel	0.09	0.46***				
BD	0.01	-0.13	-0.16			
pH	0.04	-0.12	-0.31***	-0.17*		
CEC	0.14	0.35***	0.11	-0.76***	0.11	
RTR	0.45***	0.46***	0.39***	-0.33***	-0.18*	0.30***

BD, 土壤容重(kg dm^{-3}); CEC, 阳离子交换量(cmol kg^{-1}); MAT, 年平均气温($^{\circ}\text{C}$); MAP, 平均年降水量(mm); Gravel, 土壤砾石含量(% vol.); pH, 酸碱性; RTR, 根系周转速率(a^{-1}).
BD, bulk density (g cm^{-3}); CEC, cation exchange capacity (cmol kg^{-1}); MAT, mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$); MAP, mean annual precipitation (mm); Gravel, gravel content (% vol.); pH, pH value; RTR, root turnover rate (a^{-1}).
*, $p < 0.05$; ***, $p < 0.001$.

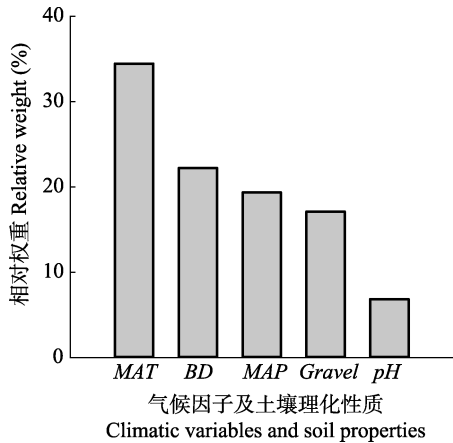


图9 气候和土壤因子对根系周转速率解释度的相对贡献。
BD, 土壤容重(kg dm^{-3}); MAT, 年平均气温($^{\circ}\text{C}$); MAP, 平均年降水量(mm); Gravel, 土壤砾石含量(% vol.); pH, 酸碱性。
Fig. 9 The relative contributions of climatic variables and soil properties to root turnover rate. BD, bulk density (g cm^{-3}); MAT, mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$); MAP, mean annual precipitation (mm); Gravel, gravel content (% vol.); pH, pH value.

周转; (2)在一定的温度范围内, 土壤有机质的矿化速率随温度的升高而增大(王常慧等, 2004; Curtin *et al.*, 2012)。温度越高, 根系凋落物被微生物分解的速率就越快, 土壤中可利用的无机氮含量就越高, 使根系氮含量增加, 根系呼吸速率加快, 消耗根系中的碳水化合物, 进而加快根系周转(Burton *et al.*, 2000; Eissenstat *et al.*, 2000; Bai *et al.*, 2008); (3)温暖地区全年无霜期较长, 延长了放牧时间(Ryan, 1991; Eissenstat & Yanai, 1997)。放牧过程中草食动物的采食和践踏会降低植物盖度, 使地表裸露面积增加, 接受更多的阳光照射, 提高土壤温度, 进而加快根系周转(马涛等, 2009; 高英志等, 2017)。在全球气候

变化背景下, 随着气温上升, 中国草地生态系统的根系周转可能随之加快。

沿平均年降水梯度, 根系周转呈现出线性增加的趋势。和温度升高带来的影响类似, 降水的增加提高了土壤湿度, 也会提高维持呼吸速率和土壤有机物的矿化速率, 进而加快根系周转。局地尺度上的控制实验也证实, 增水可以提高草地生态系统的根系周转速率(Bai *et al.*, 2010; Larreguy *et al.*, 2012)。另外, 降水增加可以提高地上生物量(Ni, 2004), 从而引起草食动物的增加及放牧强度的增加, 间接影响根系周转。

3.2 土壤理化性质对根系周转的影响机制

在土壤物理性质方面, 砾石含量、容重、土壤质地和排水性都是通过影响土壤水分来间接影响根系周转。

已有研究表明, 砾石含量越高的土壤, 其导水率越大(潘永洁等, 2015)。增大砾石含量可以提高入渗量及有效贮水量(Wilcox & Wood, 1988; 时忠杰等, 2008)。而且砾石的存在可以避免由于降雨直接打击土壤而形成地表结皮(Wilcox & Wood, 1988)。另外, 增加砾石含量可以降低因为蒸发而造成水分损失(Kosmas & Danalatos, 1993; 吕国安等, 2000; 陈士辉等, 2005)。

一般认为, 土壤容重越大, 非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度就越小(李卓等, 2010), 随着土壤容重的增加, 土壤的团粒结构丧失, 土壤变得更加紧密, 导致入渗能力、滞留贮水量、吸持贮水量和饱和贮水量降低(王辉等, 2007; 李卓等, 2010; 吴军虎等, 2013), 土壤对水分的调节能力下降, 不利于植物根系的生长(吕殿青等, 2009), 进而减缓根系周转。

土壤质地是土壤不同粒径矿物颗粒组成的综合反映, 与土壤通气状况、保水保肥能力密切相关。细质土中根系周转速率最高, 可能是由于细质土中黏粒所占比重较大, 土壤保水能力较好, 而降水(尤其是生长季降水)是影响草地生态系统生产力的主要限制因子(Bai *et al.*, 2004)。因此, 保水能力高的细质土更有利于植物根系的生长和周转(周文昌等, 2016)。然而, 随着排水等级提高(保水能力降低), 根系周转速率呈现先升高后下降的趋势, 可能是因为保水能力过高的土壤其透气性较差, 抑制了根系及土壤微生物呼吸, 从而降低根系周转速率。所以, 在

适度的保水和透气性条件下根系周转速率才能达到最高。

在土壤的化学性质方面, pH值及CEC主要通过影响酶的活性及养分的可利用性来影响根系周转。

本研究中土壤pH值介于4.9–8.4, 涵盖了弱酸性土、中性土和弱碱性土。研究认为, 弱酸性的土壤环境有利于土壤有机物矿化相关酶的活性(Leifeld *et al.*, 2013)。另外, 有研究表明, 对内蒙古典型草原弱碱性土壤进行酸化处理, 可以提高土壤水分及磷的可利用性(Chen *et al.*, 2013)。因而弱酸性的土壤环境有利于植物根系对水分和养分的获取, 促进根系周转。

CEC是反映土壤保肥供肥性能的重要指标, 土壤速效磷含量与CEC呈显著正相关关系(姜林等, 2012)。因而CEC越大, 土壤肥力越高, 根系周转也就越快。

3.3 不同草地类型根系周转存在差异

本研究中涉及的样点南北跨越22个纬度, 东西跨越46个经度, 覆盖范围较广, 5种不同草地类型是其所在地区植被、气候、地形、土壤等特性的综合反映。不同草地类型之间根系周转存在显著的差异, 说明气候、土壤等因子的不同组合对根系周转的影响结果不同。对于温带地区的荒漠草原而言, 降水是影响根系周转的主要限制因素(冯雨峰, 1990), 而对于降水丰沛的高寒草甸而言, 温度就成了限制根系周转的主要因素(Leifeld *et al.*, 2015)。这就造成了在全球气候变化背景下, 不同草地类型的根系周转对气候变化的响应有所不同。比如随着全球气温上升, 高寒草甸根系周转加快, 而荒漠草原的根系周转将可能受到更加严重的限制。

3.4 中国草地根系周转的格局和驱动因子与全球及其他区域研究结果的差异

本研究中根系周转随温度升高而加快, 该结果与全球尺度(Gill & Jackson, 2000)及欧洲山地草原(Leifeld *et al.*, 2015)的研究结果一致, 但是函数关系却有明显差异。前者是线性增长的关系, 后两者皆是指数增长的关系, 而一些局地尺度上的控制实验则表明年平均气温对根系周转没有明显的影响(Bai *et al.*, 2010; Gill & Jackson, 2000), 甚至是负的影响(Edwards *et al.*, 2004)。由此可见, 温度对根系周转的影响具有很强的尺度依赖性。对降水而言, 本研究中根系周转速率和降水之间呈现显著的正相

关关系, 与Bai (2010)在局地尺度上的控制实验结果一致。中国草地根系周转沿温度和降水梯度上的分布格局与全球尺度的研究结果存在较大的差异, 分析原因主要包括以下两方面: 一方面缘于尺度效应, 另一方面是Gill和Jackson (2000)的研究中取样点较少, 且分布不均以及周转速率计算方法上的不统一带来的不确定性引起的。

气候因子和土壤理化性质通过影响土壤酶的活性、呼吸、矿化、土壤水分及养分的可利用性等途径共同影响根系周转。不同草地类型之间根系周转速率存在显著差异。根系周转的空间格局具有尺度依赖性, 中国草地的研究结果与其他区域存在差异, 在对全球尺度根系周转的研究中需要将中国草地的数据纳入其中, 多尺度、多视角进行整合分析, 为草地生态系统生产力及固碳潜力估算提供更加可靠的参数, 具有重要的现实意义。

致谢 中国科学院战略性先导科技专项草地课题的李永强、刘伟、孙庚、唐立孙、刘耘华、吴彦、郝彦宾为本研究提供了部分野外实测数据, 在此表示感谢。

参考文献

- Aber JD, Melillo JM, Nadelhoffer KJ, McClaugherty CA, Pastor J (1985). Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability: A comparison of two methods. *Oecologia*, 66, 317–321.
- Allard V, Newton PCD, Lieffering M, Soussana JF, Carran RA, Matthew C (2005). Increased quantity and quality of coarse soil organic matter fraction at elevated CO₂ in a grazed grassland are a consequence of enhanced root growth rate and turnover. *Plant and Soil*, 276, 49–60.
- Bai WM, Wan SQ, Niu SL, Liu WX, Chen QS, Wang QB, Zhang WH, Han XG, Li LH (2010). Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: Implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology*, 16, 1306–1316.
- Bai WM, Wang ZW, Chen QS, Zhang WH, Li LH (2008). Spatial and temporal effects of nitrogen addition on root life span of *Leymus chinensis* in a typical steppe of Inner Mongolia. *Functional Ecology*, 22, 583–591.
- Bai YF, Han XG, Wu JG, Chen ZZ, Li LH (2004). Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 431, 181–184.
- Burton AJ, Pregitzer KS, Hendrick RL (2000). Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 125, 389–399.

- Chai X, Liang CZ, Liang MW, Han WH, Li ZY, Miao BL, Wang W, Wang LX (2014). Seasonal dynamics of below-ground biomass and productivity and potential of carbon sequestration in meadow steppe and typical steppe, in Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 5530–5540. [柴曦, 梁存柱, 梁茂伟, 韩伟华, 李智勇, 苗百岭, 王伟, 王立新 (2014). 内蒙古草甸草原与典型草原地下生物量与生产力季节动态及其碳库潜力. 生态学报, 34, 5530–5540.]
- Chen D, Lan Z, Bai X, Grace JB, Bai Y, van der Heijden M (2013). Evidence that acidification-induced declines in plant diversity and productivity are mediated by changes in below-ground communities and soil properties in a semi-arid steppe. *Journal of Ecology*, 101, 1322–1334.
- Chen SH, Xie ZK, Wang YJ, Wei XH (2005). Moisture storage effect of gravel mulch with different grain size on water-melon field. *Journal of Desert Research*, 25, 433–436. [陈士辉, 谢忠奎, 王亚军, 魏兴琥 (2005). 砂田西瓜不同粒径砾石覆盖的水分效应研究. 中国沙漠, 25, 433–436.]
- Chen ZZ, Huang DH (1988). A measurement to underground productivity and turnover value of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* grassland at Xilin River Valley, Inner Mongolia. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Science eds. *Research on Grassland Ecosystem*, No. 2. Science Press, Beijing. 132–138. [陈佐忠, 黄德华 (1988). 内蒙古锡林河流域羊草草原与大针茅草原地下部分生产力和周转值的研究. 见: 中国科学院内蒙草原生态系统研究站主编. 草原生态系统研究(II). 科学出版社, 北京. 132–138.]
- Clark DA, Brown S, Kicklighter DW, Chambers JQ, Thomlinson JR, Ni J, Holland EA (2001). Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11, 371–384.
- Curtin D, Beare MH, Hernandez-Ramirez G (2012). Temperature and moisture effects on microbial biomass and soil organic matter mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 2055–2067.
- Dahlman RC, Kucera CL (1965). Root productivity and turnover in native prairie. *Ecology*, 46, 84–89.
- de Bello F, Dolezal J, Ricotta C, Klimesova J (2011). Plant clonal traits, coexistence and turnover in East Ladakh, Trans-Himalaya. *Preslia*, 83, 315–327.
- Department of Animal Husbandry and Veterinary, General Station of Animal Husbandry and Veterinary of Ministry of Agriculture of China (1996). *Rangeland Resources of China*. China Science and Technology Press, Beijing. [中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站 (1996). 中国草地资源. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Edwards EJ, David GB, Louise AM, Alastair HF (2004). Root production is determined by radiation flux in a temperate grassland community. *Global Change Biology*, 10, 209–227.
- Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD (2000). Building roots in a changing environment: Implications for root longevity. *New Phytologist*, 147, 33–42.
- Eissenstat DM, Yanai RD (1997). The ecology of root lifespan. *Advances in Ecological Research*, 27, 1–60.
- Feng YF (1990). Estimates of belowground biomass and turnover of *Stipa klemenzi* shrub desert steppe in Inner Mongolia. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Science ed. *Research on Grassland Ecosystem*, No. 2. Science Press, Beijing. 27–31. [冯雨峰 (1990). 内蒙古灌丛化石生针茅荒漠草原地下生物量与周转值的测定. 见: 中国科学院内蒙草原生态系统研究站主编. 草原生态系统研究(II). 科学出版社, 北京. 27–31.]
- Fitter AH, Graves JD, Wolfenden J, Self GK, Brown TK, Bogie D, Mansfield T (1997). Root production and turnover and carbon budgets of two contrasting grasslands under ambient and elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. *New Phytologist*, 137, 247–255.
- Gao YZ, Jing X, Wang XY (2017). Impact of grazing and clipping on grassland belowground net primary productivity and root turnover. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 43(2), 111–117. [高英志, 景馨, 王新宇 (2017). 放牧和刈割对草原地下净生产力和根系周转的影响. 西南民族大学学报(自然科学版), 43(2), 111–117.]
- Gill RA, Jackson RB (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 147, 13–31.
- Gupta SR, Singh JS (1982). Influence of floristic composition on the net primary production and dry matter turnover in a tropical grassland. *Australian Journal of Ecology*, 7, 363–374.
- Hayes DC, Seastedt TR (1987). Root dynamics of tallgrass prairie in wet and dry years. *Canadian Journal of Botany*, 65, 787–791.
- He JS, Wang ZQ, Fang JY (2004). Issues and prospects of belowground ecology with special reference to global climate change. *Chinese Science Bulletin*, 49, 1226–1233. [贺金生, 王政权, 方精云 (2004). 全球变化下的地下生态学: 问题与展望. 科学通报, 49, 1226–1233.]
- Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94, 7362–7366.
- Jiang L, Geng ZC, Li SS, She D, He XS, Zhang Q, Liang C, Liu XD, Jing WM, Wang SL (2012). Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xishui Forest Zone of the Qilian Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 3368–3377. [姜林, 耿增超, 李珊珊, 余雕, 何绪生, 张强, 梁策, 刘贤德, 敬文茂, 王顺利 (2012). 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布. 生态学报, 32, 3368–3377.]

- Jiang S, Qi QH, Kong DZ (1985). The primary research about biomass of the *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* grassland community. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Science ed. *Research on Grassland Ecosystem, No. 1*. Science Press, Beijing. 12–22. [姜恕, 戚秋慧, 孔德珍 (1985). 羊草草原群落和大叶针茅草原群落生物量的初步比较研究. 见: 中国科学院内蒙草原生态系统研究站主编. 草原生态系统研究(I). 科学出版社, 北京. 12–22.]
- Kosmas CS, Danalatos NG (1993). The impacts of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semiarid conditions. *Soil Technology*, 6, 337–349.
- Larreguy C, Carrera AL, Bertiller MB (2012). Production and turnover rates of shallow fine roots in rangelands of the Patagonian Monte, Argentina. *Ecological Research*, 27, 61–68.
- Leifeld J, Bassin S, Conen F, Hajdas I, Egli M, Fuhrer J (2013). Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland. *Biogeochemistry*, 112, 59–69.
- Leifeld J, Meyer S, Budge K, Sebastia MT, Zimmermann M, Fuhrer J (2015). Turnover of grassland roots in mountain ecosystems revealed by their radiocarbon signature: Role of temperature and management. *PLOS ONE*, 10, e0119184. DOI: 10.1371/journal.pone.0119184.
- Li YN (1998). Relationship between underground biomass and meteorological conditions and turnover value of alpine meadow plants. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 19(1), 36–38. [李英年 (1998). 高寒草甸植物地下生物量与气象条件的关系及周转值分析. 中国农业气象, 19(1), 36–38.]
- Li Z, Wu PT, Feng H, Zhao XN, Huang J, Zhuang WH (2010). Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity. *Acta Pedologica Sinica*, 47, 611–620. [李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化 (2010). 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. 土壤学报, 47, 611–620.]
- Lü DQ, Shao MA, Pan Y (2009). Dependent relationship between bulk density changes and soil water characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23, 209–212. [吕殿青, 邵明安, 潘云 (2009). 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究. 水土保持学报, 23, 209–212.]
- Lü GA, Chen ML, Wang CC (2000). Study on the soil water characteristics of the lithosol in the Danjiangkou Reservoir basin. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 19, 342–345. [吕国安, 陈明亮, 王春潮 (2000). 丹江口库区石渣土土壤水分特性研究. 华中农业大学学报, 19, 342–345.]
- Ma T, Dong YS, Qi YC, Xu FL, Peng Q, Jin Z (2009). Effects of grazing on soil respiration in typical *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Geographical Research*, 28, 1040–1046. [马涛, 董云社, 齐玉春, 徐福利, 彭琴, 金钊 (2009). 放牧对内蒙古羊草群落土壤呼吸的影响. 地理研究, 28, 1040–1046.]
- Milchunas DG (2009). Estimating root production: Comparison of 11 methods in shortgrass steppe and review of biases. *Ecosystems*, 12, 1381–1402.
- Milchunas DG, Lauenroth WK, Singh JS, Cole CV, Hunt HW (1985). Root turnover and production by ^{14}C dilution: Implications of carbon partitioning in plants. *Plant and Soil*, 88, 353–365.
- Ni J (2004). Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China. *Plant Ecology*, 174, 217–234.
- Odum EP (1960). Organic production and turnover in old field succession. *Ecology*, 41, 34–49.
- Pan YJ, Lü SH, Gao YH, Li ZG (2015). Simulation of influence of gravel on soil thermal and hydraulic properties on Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 34, 1224–1236. [潘永洁, 吕世华, 高艳红, 李照国 (2015). 砾石对青藏高原土壤水热特性影响的数值模拟. 高原气象, 34, 1224–1236.]
- Peng YF, Guo DL, Yang YH (2017). Global patterns of root dynamics under nitrogen enrichment. *Global Ecology and Biogeography*, 26, 102–114.
- Penning de Vries FWT (1975). The cost of maintenance process in plant cells. *Annual of Botany*, 39, 77–92.
- Ryan MG (1991). Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1, 157–167.
- Schippers P, Olff H (2000). Biomass partitioning, architecture and turnover of six herbaceous species from habitats with different nutrient supply. *Plant Ecology*, 149, 219–231.
- Shaver GR, Billings WD (1975). Root production and root turnover in a wet tundra ecosystem, Barrow, Alaska. *Ecology*, 56, 401–409.
- Shi ZJ, Wang YH, Yu PT, Xu LH, Xiong W, Guo H (2008). Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 6090–6098. [时忠杰, 王彦辉, 于澎湃, 徐丽宏, 熊伟, 郭浩 (2008). 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响. 生态学报, 28, 6090–6098.]
- Tom MS, Trumbore SE, Chadwick OA, Vitousek PM, Hendricks DM (1997). Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, 389, 170–173.
- Trumbore SE, Gaudinski JB (2003). The secret lives of roots. *Science*, 302, 1344–1345.
- Vogt KA, Crier CC, Vogt DJ (1986). Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 15, 303–377.
- Volder A, Gifford RM, Evans JR (2007). Effects of elevated atmospheric CO_2 , cutting frequency, and differential day/night atmospheric warming on root growth and turnover of *Phalaris swards*. *Global Change Biology*, 13, 1040–1052.

- Wang CH, Xing XR, Han XG (2004). The effects of temperature and moisture on the soil net nitrogen mineralization in an *Aneulolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 11, 2472–2476. [王常慧, 邢雪荣, 韩兴国 (2004). 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响. *生态学报*, 11, 2472–2476.]
- Wang CT, Wang QJ, Long RJ, Jing ZC, Shi HL (2004). Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 240–245. [王长庭, 王启基, 龙瑞军, 景增春, 史惠兰 (2004). 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究. *植物生态学报*, 28, 240–245.]
- Wang CT, Wang QJ, Shen ZX, Jing ZC, Wang WY (2003). Response of biodiversity and productivity to simulated rainfall on an alpine *Kobresia humilis* meadow. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 10, 1713–1718. [王长庭, 王启基, 沈振西, 景增春, 王文颖 (2003). 高寒矮嵩草草甸群落植物多样性和初级生产力对模拟降水的响应. *西北植物学报*, 10, 1713–1718.]
- Wang H, Wang QJ, Shao MA (2007). Effect of soil bulk density on soil nutrient in runoff from loess slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21(3), 10–13. [王辉, 王全九, 邵明安 (2007). 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响. *水土保持学报*, 21(3), 10–13.]
- Wang W, Peng SS, Fang JY (2008). Biomass distribution of natural grasslands and its response to climate change in North China. *Arid Zone Research*, 25, 90–97. [王妮, 彭书时, 方精云 (2008). 中国北方天然草地的生物量分配及其对气候的响应. *干旱区研究*, 25, 90–97.]
- Wilcox B P, Wood MK (1988). Factors influencing inter rill erosion from semiarid slopes in New Mexico. *Journal of Range Management*, 42, 66–70.
- Wu JH, Zhang TG, Zhao W, Li JK, Yang L (2013). Influence of soil bulk density on soil water infiltration characteristics under different soil organic matter contents. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27(3), 63–67. [吴军虎, 张铁钢, 赵伟, 李家科, 杨亮 (2013). 容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响. *水土保持学报*, 27(3), 63–67.]
- Wu YB, Che RX, Ma S, Deng YC, Zhu MJ, Cui XY (2014). Estimation of root production and turnover in an alpine meadow: Comparison of three measurement methods. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 3529–3537. [吴伊波, 车荣晓, 马双, 邓永翠, 朱敏健, 崔骁勇 (2014). 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究. *生态学报*, 34, 3529–3537.]
- Yu WT, Yu YQ (2001). Reviewed of plant underground biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12, 927–932. [宇万太, 于永强 (2001). 植物地下生物量研究进展. *应用生态学报*, 12, 927–932.]
- Zhou WC, Suolang DEJ, Cui LJ, Wang YF, Li W (2016). Effects of drainage on soil organic carbon stock in the Zoige peatlands eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 2123–2132. [周文昌, 索郎夺尔基, 崔丽娟, 王义飞, 李伟 (2016). 排水对若尔盖高原泥炭地土壤有机碳储量的影响. *生态学报*, 36, 2123–2132.]
- Zhu TC (1993). Grasslands of China. In: Coupland RT ed. *Ecosystems of the World: Eastern Hemisphere and Résumé, No. 8B*. Elsevier, Amsterdam. 61–82.

责任编辑: 王德利 责任编辑: 李 敏

附录I 数据提取文献来源

Appendix I List of papers from which data are extracted for this database

<http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe.2017.0241-A1.pdf>

附录II 气候及土壤因子多重共线性检验

Appendix II Multicollinearity test of climatic variables and soil properties

<http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe.2017.0241-A2.pdf>

附录III 气候因子及土壤理化性质

Appendix III Climatic variables and soil properties

<http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe.2017.0241-A3.pdf>



扫码加入读者圈
听语音, 看问答