

# 细根对降水变化响应的meta分析

张鑫<sup>1</sup> 邢亚娟<sup>1,2</sup> 闫国永<sup>1</sup> 王庆贵<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>黑龙江大学农业资源与环境学院, 哈尔滨 150080; <sup>2</sup>黑龙江省林业科学研究所, 哈尔滨 150081

**摘要** 细根对土壤水分含量变化十分敏感, 增加和减少降水直接影响土壤水分含量。为探索细根对降水变化的响应, 该文从48篇已发表的国内外研究论文中搜集到202组数据, 通过meta分析的方法揭示细根生物量、生产量、周转率、根长度密度、比根长及细根分解对增加和减少降水的一般响应规律, 用加权响应比评价降水对细根各指标的影响效应, 降水变化对细根分解的影响用土壤微生物生物量碳的响应比衡量。结果表明: 1) 不同类型植物的细根对降水变化的响应程度不同, 灌木细根的响应强于乔木。2) 细根各指标对降水变化的响应存在土层空间异质性, 并且降水变化量为50%时细根响应最显著。降水增加50%时, 显著增加20–40 cm土层的细根生物量和0–10 cm土层的细根比根长, 降水减少50%时, 显著减少20–40 cm土层的细根生产量和增加0–10 cm土层的细根根长度密度。3) 降水变化实验持续时间的长短会影响细根的响应程度, 短期实验中细根通过形态适应对降水变化做出应对, 而长期实验中细根通过重新分配生物量对降水变化做出响应。4) 增加降水促进了细根养分归还, 致使土壤微生物得到了充足的底物资源, 提高了自身活性, 使细根分解加快。

**关键词** 降水变化; 细根生物量; 生产量; 根长度密度; 比根长; 细根分解; meta分析

张鑫, 邢亚娟, 闫国永, 王庆贵 (2018). 细根对降水变化响应的meta分析. 植物生态学报, 42, 164–172. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0203

## Response of fine roots to precipitation change: A meta-analysis

ZHANG Xin<sup>1</sup>, XING Ya-Juan<sup>1,2</sup>, YAN Guo-Yong<sup>1</sup>, and WANG Qing-Gui<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; and <sup>2</sup>Institute of Forestry Science of Heilongjiang Province, Harbin 150081, China

### Abstract

**Aims** The response of fine roots to soil moisture is very sensitive. Climate change scenarios predict changes in precipitation which influence soil moisture directly. Plants optimize resource acquisition by fine root morphological plasticity and biomass redistribution when soil moisture changes. Therefore, it is important to study the effect of precipitation increase and decrease on fine roots and reveal the response of ecosystem carbon cycling to global climate change.

**Methods** We collected 202 sets of data from 48 published domestic and foreign articles, and analyzed the responses of fine root biomass, production, turnover, root length density, specific root length and soil microbial biomass carbon which reflects fine root decomposition dynamic to precipitation change by the meta-analysis. RR<sub>++</sub> (weighted response ratio) was used to quantify the effect size of the response of fine roots to precipitation change.

**Important findings** (1) The significance and magnitude of the precipitation effects on fine roots varied among plant types. Shrub fine roots had stronger response than tree fine roots. (2) The response of fine roots differed across soil depth. Fine root had most significant responses when the precipitation increased or decreased 50%. A 50% increase in precipitation had a significant positive impact on both fine root biomass in 20–40 cm soil and specific root length in 0–10 cm soil depth. A 50% decreased in precipitation had a significant negative impact on fine root production in 20–40 cm soil but positive impact on root length density in 0–10 cm soil. (3) The duration of experiment affected the response of fine roots, fine roots responded to precipitation changes (increase and decrease) by morphological plasticity in short-term experiments, and by biomass redistribution in long-term experiments. (4) Increasing precipitation contributed to the nutrient release of fine roots, because soil microbes accelerated the decomposability of fine roots due to sufficient substrate resources stimulated their own activity.

收稿日期Received: 2017-08-10 接受日期Accepted: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(41773075、41575137、31370494和31170421)、科技部基础性工作专项A类项目(2014FY110600)和黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201406)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41773075, 41575137, 31370494 and 31170421), the National Basic Research Priorities Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014FY110600) and the Key Projects of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (ZD201406).

\* 通信作者Corresponding author (qgwang1970@163.com)

**Key words** precipitation change; fine root biomass; production; root length density; specific root length; fine root decomposition; meta-analysis

Zhang X, Xing YJ, Yan GY, Wang QG (2018). Response of fine roots to precipitation change: A meta-analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 164–172. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0203

近年来, 干旱、洪水、风暴等极端气候事件的普遍发生导致降水格局改变(IPCC, 2013)。细根是指直径小于2 mm的根(McCormack *et al.*, 2015), 在植物响应降水变化的过程中起着至关重要的作用。植物可通过调整细根形态、重新分配细根生物量以进行适应性调节, 从而优化资源获取。不同植物生活型(乔木、灌木和草本植物)的细根形态和生物量对降水变化的响应不同, 具体表现为: 1)比根长与根长度密度的变化。比根长和根长度密度从不同角度反映了植物碳分配策略, 即根系经济学层面的理论。生长在不同温度带的乔木细根表现出形态差异(常文静和郭大立, 2008), 不同类型植物根据各自的碳分配策略分别做出相应的形态调整。增加降水导致生长在亚热带和温带的乔木细根根长度密度增加, 而比根长没有显著变化(Coleman, 2007; Herzog *et al.*, 2014), 但de Visser等(1994)研究发现灌溉使北方森林乔木20–40 cm土层的比根长显著增加, 乔木细根对增加降水的响应可能与生长环境有关。增加降水对灌木的细根根长度密度和比根长的影响并不显著(Verburg *et al.*, 2013; Jerbi *et al.*, 2015)。减少降水则导致乔木和灌木细根比根长显著增加(韩艳英等, 2014; 钟波元等, 2016), 钟波元等(2016)对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗细根进行隔离降水处理时发现细根比根长显著增加, 生长出单位质量更大的细根, 有利于树木在土壤水分短缺时优化收入/产出比。韩艳英等(2014)在研究灌木西藏砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)根系时发现干旱条件下比根长较大, 其养分与水分吸收效率相对较高, 有利于适应干旱环境的生长。2)细根生物量的重新分配。以往对细根生物量受降水影响的研究并没有定论, 增加降水使亚热带和温带乔木细根的生物量显著增加(Coleman, 2007; Chen *et al.*, 2015), Moser等(2010)对热带树种进行短期浇灌实验中并没有发现细根生物量的显著变化, 而Gei和Powers (2015)发现热带雨林中雨季的细根生物量高于干旱季节, 并且土壤水分主要来源于降水, 随土层深度增加而降低, 细根生物量主要集中在水分充足的土壤表层。灌木的细根生物量也随降水增加而增加(Ansley *et al.*,

2014)。在不同持续时间的模拟降水增加实验中, 短期内草地细根生物量增加, 而长期实验中细根生物量减少(Fiala *et al.*, 2012; Kong *et al.*, 2013)。各植物类型细根生物量对降水减少的响应也有所不同, 以往研究发现各温度带的乔木细根生物量在减少降水实验中因细根死亡率高其生长速率而表现出生物量显著减少(Konôpka *et al.*, 2012; Moser *et al.*, 2014; 钟波元等, 2016)。Hertel等(2013)研究却发现, 干旱草地的细根生物量在土壤有机层中的比例非但没有减少, 反而增加了。资源最优分配理论则预测植物在干旱及土壤水分亏缺的情况下应该增加吸收水分与蒸发水分的比率, 即水分不足应促进细根的生长、增加生物量和表面积, 从而吸收足够的水分。上述研究结果表明不同植物类型的细根对降水变化的响应存在差异, 可能与细根生长特性、养分资源或实验持续时间有关。

细根的生产力和周转率占全球陆地净初级生产力的22% (McCormack *et al.*, 2015), 以往研究表明增加降水使草地细根生产量和周转率显著增加(Bai *et al.*, 2010; Fiala *et al.*, 2012), 热带、亚热带和北方森林的细根生产量均显著增加(Bai *et al.*, 2010; Olesinski *et al.*, 2011; Ford *et al.*, 2012)。减少草地年降水量导致根生产量减少(Fiala *et al.*, 2009), Yuan和Chen (2010)的meta分析也表明降水减少导致北方森林根系周转率和生产力下降。可见, 降水变化直接影响细根的生产力和周转率, 进而影响土壤碳循环。

土壤微生物是植物营养转化及循环的介质, 细根分解与土壤微生物相互依存, 为土壤微生物提供营养(Zi *et al.*, 2017), 而土壤微生物是细根分解过程中的重要参与者(McClaugherty *et al.*, 1982; 武志超等, 2012), 已有研究指出土壤水分通过直接影响微生物的活动, 进而间接影响细根分解(Berg & McLaugherty, 2003)。由于土壤微生物对降水变化的响应比植物更敏感(张静茹等, 2014), 同时土壤微生物生物量碳在一定程度上代表了参与细根分解过程的微生物数量和活性(Larsen *et al.*, 2002; Taylor *et al.*, 2002), 本文通过降水变化对土壤微生物生物量

碳的影响揭示细根分解对降水变化的响应。Chapin等(2002)指出土壤水分增加导致O<sub>2</sub>不足,抑制微生物活性,从而降低细根分解,但此观点忽略了厌氧微生物对细根的分解作用。García-Palacios等(2016)在长期(11年)模拟降水变化实验中发现减水导致土壤微生物量减少,却促进了细根分解。因此,研究降水变化对土壤微生物的影响,可以间接评价细根分解对未来全球气候变化的响应。

以往关于细根响应降水变化的研究都是针对同类型植物,缺少对各植物类型细根应对降水变化的比较。因此,本文应用meta分析的方法,从48篇已发表的国内外论文中搜集到202组数据,探究以下问题:不同植物类型细根生物量、生产量、周转率、根长度密度、比根长和细根分解对降水变化的响应如何?是否存在土层空间异质性?是否因降水变化量或实验持续时间的不同而发生变化?本研究可为降水变化对全球不同植物类型细根动态及碳循环的影响提供数据支持。

## 1 研究方法

### 1.1 文献选择及数据库建立

本文研究以细根、降水、水分等关键词检索Web of Science、Springer-Link Journals、EBSCO、CNKI和ResearchGate等中英文期刊数据库,收集发表在2007–2017年的所有满足条件且可获取的论文用于meta分析。结合本研究目的,所筛选的论文必须满足以下条件:(1)实验必须设有对照组和处理组。(2)同一实验中的对照组和处理组必须设置于相同气候、土壤、植物类型下。(3)实验样地除降水处理外无温度、矿质养分变化等其他因素处理。(4)从论文中直接提取或用GetData v2.22从图片中提取到细根相关参数的平均值、标准偏差、标准误差、置信区间和样本容量。通过筛选,本研究利用搜集的48篇实验性文献(附录I)建立细根对降水变化响应的数据库,包括作者、发表年限以及实验的相关背景数据。其中,背景数据包括实验地点、植物类型、降水变化量、实验持续时间、采样季节、采样土层深度。细根参数包括细根生物量、生产量、周转率、根长度密度(RLD)、比根长(SRL)、土壤微生物量碳(MBC)(附录II)。

### 1.2 数据分组及分析方法

首先,根据实验目的进行数据分组。将植物类

型划分为热带乔木、亚热带乔木、温带乔木、北方乔木、灌木和草本植物。按实验持续时间划分为短期(<1年)、中期(1–3年)和长期实验(>3年)。本文将增加和减少的降水变化量划分为:<50%、50%–100%、100%–200%、>200% 4个区间,并根据Jerbi等(2015)的研究结果,按土层深度0–10 cm、10–20 cm、20–40 cm分组,进行亚组分析。其次,计算响应比(RR)并进行对数转换,用于评估增加或减少降水对细根各指标的影响效应,计算公式为:

$$\ln RR = \ln(X_t / X_c) \quad (1)$$

其中X<sub>t</sub>为处理组平均值, X<sub>c</sub>为对照组平均值(Hedges *et al.*, 2008)。

运用Metawin 2.1软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)中的随机模型计算平均加权响应比(RR<sub>++</sub>)和95%置信区间, RR<sub>++</sub>为正值则为正效应, 负值则为负效应。如果95%置信区间不包括0, 表示细根指标对降水变化响应显著; 反之, 则响应不显著。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同类型植物细根对增加或减少降水的响应

由图1A可知, 增加降水条件下, 各类型植物细根生物量中只有灌木变化显著(响应比0.06, 95%置信区间(以下简称CI) 0.04, 0.08)。增加降水使草地细根根长度密度显著增加(响应比0.90, 95% CI 0.03, 1.77), 而对亚热带乔木、温带乔木和灌木影响不显著, 对北方森林乔木细根比根长的影响呈显著正效应(响应比0.07, 95% CI 0.01, 0.13)。减少降水对亚热带乔木(响应比–0.58, 95% CI –0.93, –0.23)、温带乔木(响应比–0.28, 95% CI –0.51, –0.05)和灌木(响应比–1.72, 95% CI –2.95, –0.49)细根生物量的影响均表现为显著负效应, 而对热带乔木细根生物量的影响不显著(图1B)。

### 2.2 不同土层细根对降水变化的响应

由图2A和2B可知, 细根生长对降水变化量为50%的响应最显著, 而且不同土层的细根对降水变化的响应程度不同, 可见细根对降水变化的响应存在空间异质性。降水增加量小于50%时(图2A), 显著增加20–40 cm土层的细根生物量(响应比0.23, 95% CI 0.04, 0.42)和10–20 cm的细根比根长(响应比0.07, 95% CI 0.01, 0.13)。降水增加量为50%–100%时, 显著增加10–20 cm土层的细根生物量(响应比0.18,

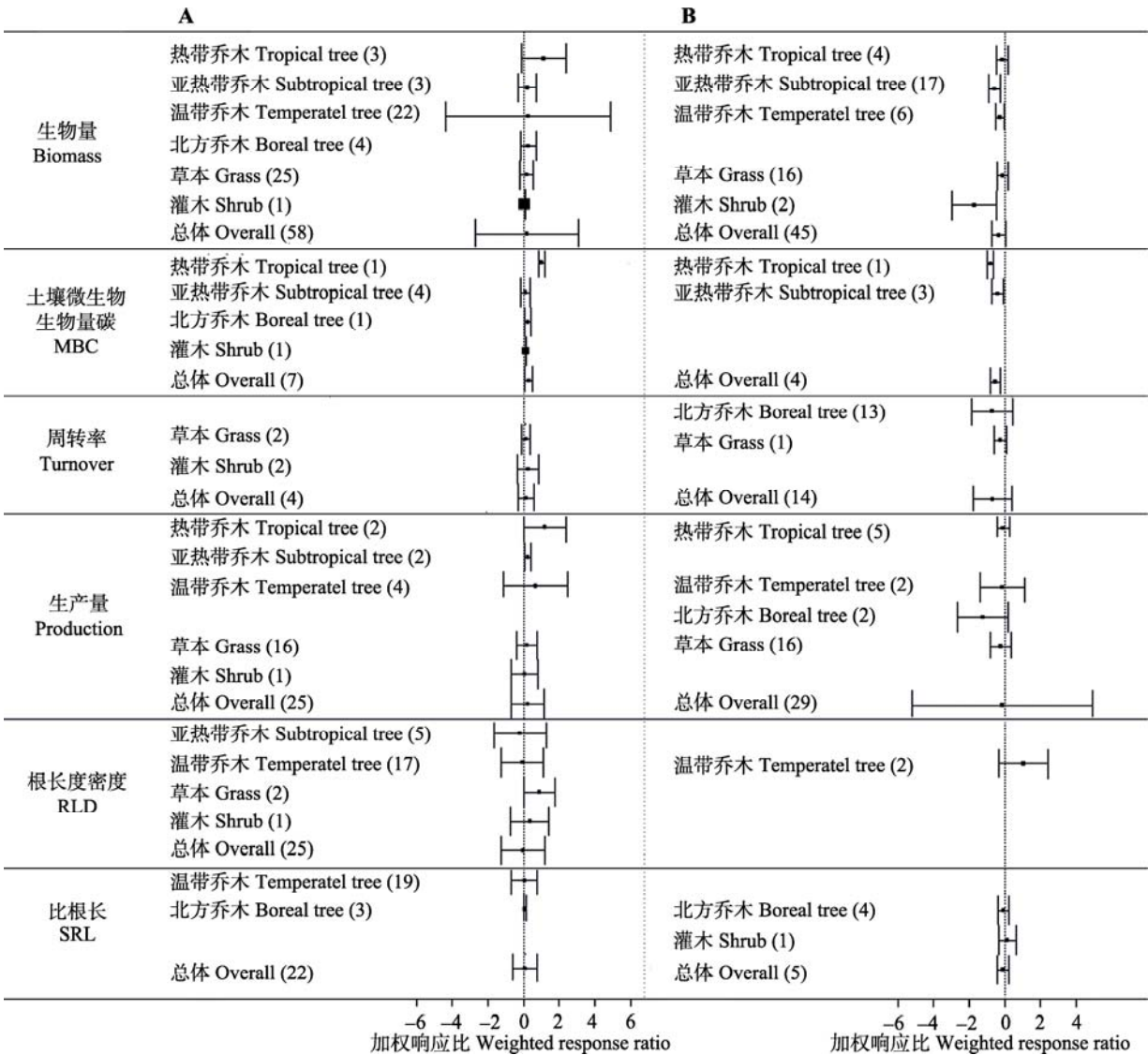


图1 不同类型植物细根和土壤微生物生物量碳对增加(A)或减少(B)降水的加权响应比。括号内数字代表样本量, 误差线代表95%置信区间。

Fig. 1 Weighted response ratio of increasing (A) or reducing (B) precipitation on fine root of different plant type and soil microbial biomass carbon. The variables are categorized into different groups depending on plant types. The number in parentheses represents the sample size for each variable. Error bars represent 95% confidence intervals. MBC, soil microbial biomass carbon; RLD, root length density; SRL, specific root length.

95% CI 0.01, 0.35)。降水增加量大于200%时, 显著增加0–10 cm土层的细根生物量(响应比0.26, 95% CI 0.05, 0.47), 细根生物量和比根长对增加降水的响应强于减少降水。降水减少量少于50%时(图2B), 显著减少20–40 cm土层细根生产量(响应比–0.79, 95% CI –1.30, –0.28), 显著增加0–10 cm土层细根根长度密度(响应比0.95, 95% CI 0.10, 1.80)。降水量减少50%–200%对细根没有显著影响, 细根生产量和细根根长度密度对减少降水的响应强于增加降水。

2.3 细根对不同降水变化实验持续时间的响应

细根对不同降水变化实验持续时间的响应主要

表现为生物量、根长度密度的变化。不同持续时间的降水变化实验中, 细根生物量只在3年以上的长期减少降水实验中表现出显著负效应(响应比–0.28, 95% CI –0.48, –0.08)(图3B), 在3年以内的实验中变化不显著。细根根长度密度只在1年以内的短期增加降水实验中表现出显著正效应(响应比0.26, 95% CI 0.01, 0.51)(图3A), 而在1年以上的实验中变化不显著, 表明长期降水变化实验显著影响地下碳分配, 而短期实验中细根通过形态适应对降水变化做出应对。细根的比根长、周转率与生产量对降水变化的响应不受实验时长的影响。

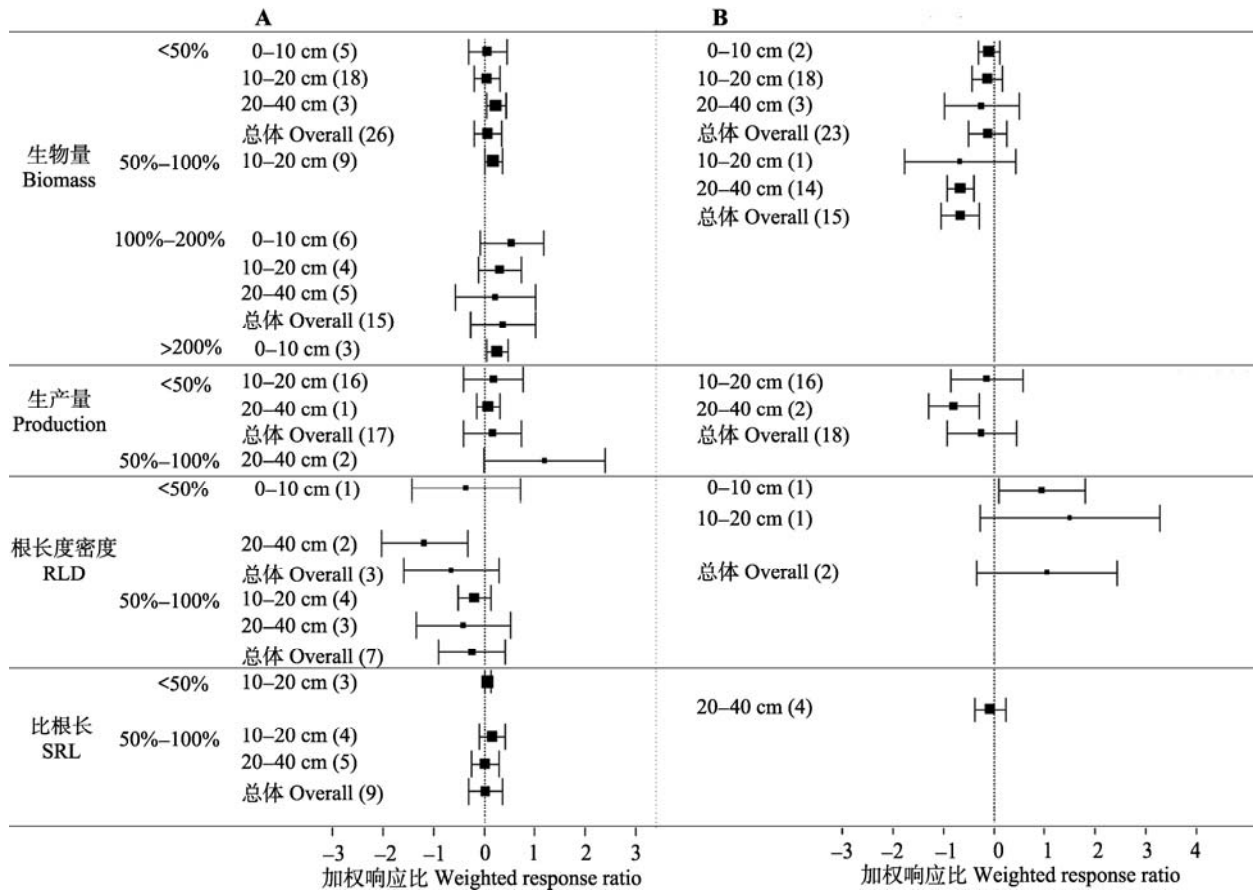


图2 各土层细根指标对不同增加(A)或减少(B)降水量的加权响应比。括号内数字代表样本量, 误差线代表95%置信区间。  
Fig. 2 Weighted response ratio (RR<sub>++</sub>) of different increasing (A) or reducing (B) precipitation amount on each soil layer fine root. The variables are categorized into different groups depending on duration. The number in parentheses represents the sample size for each variable. Error bars represent 95% confidence intervals. RLD, root length density; SRL, specific root length.

## 2.4 土壤微生物生物量碳对降水变化的响应

增加降水使土壤微生物生物量碳显著增加(总响应比0.29, 95% CI 0.07, 0.51), 且各植物类型下的土壤微生物生物量碳响应均显著, 热带乔木、北方乔木、灌木对增加降水的响应比分别为1.01 (95% CI 0.84, 1.18)、0.24 (95% CI 0.07, 0.41)和0.13 (95% CI 0.10, 0.16)(图1A)。减少降水导致土壤微生物生物量碳显著降低(总响应比-0.53, 95% CI -0.83, -0.23)。热带乔木和亚热带乔木植被下的土壤微生物生物量在降水减少的条件下均显著降低, 响应比分别为-0.81 (95% CI -0.99, -0.63)、-0.41 (95% CI -0.74, -0.18)(图1B)。由此可见, 各类型植物的细根分解易受降水变化的影响。土壤微生物生物量碳对不同降水变化实验时长的响应均显著, 短于3年的增加降水实验中, 土壤微生物生物量碳显著增加(1年以内的响应比0.13, 95% CI 0.10, 0.16; 1–3年的响应比0.45, 95% CI 0.31, 0.59)(图3A)。长于1年的减少降水实验中, 土壤微生物生物量碳显著减少(1–3年的响

应比-0.81, 95% CI -1.00, -0.63; 3年以上的响应比-0.41, 95% CI -0.74, -0.08)(图3B)。因此, 土壤微生物对土壤环境变化十分敏感, 细根分解对降水变化的显著响应或与实验持续时间无关。

## 3 讨论

### 3.1 不同类型植物细根对降水变化的响应差异

不同植物对营养的需求和碳分配策略均有所不同, 导致细根在响应降水变化时表现出差异性(陈明涛和赵忠, 2011)。本研究发现灌木对降水格局变化的响应强于乔木, Starr和Oberbauer (2008)指出在非乔木植物中, 根系大多分布在浅土层且木质化较少, 如草本和灌木在响应积雪厚度变化时表现出比乔木更强的可塑性。灌木表现出较强的可塑性可能与灌木浅层根系为细根型群落根系(反J型根系生态位径级分布)有关(董宾芳, 2015), 灌木的表层土壤根系主体为细根( $\leq 1$  mm), 而乔木林地浅层根系为细-粗混合型群落根系, 表层土壤根系同时包括细根



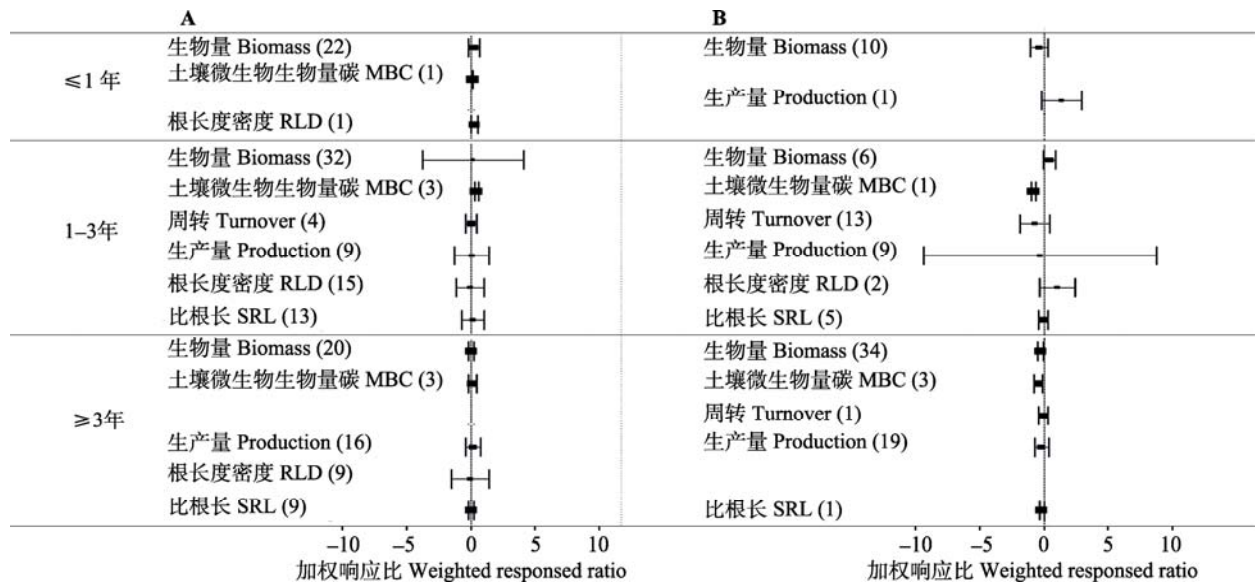


图3 不同实验持续时间下细根和土壤微生物生物量碳对增加(A)或减少(B)降水的加权响应比。括号内数字代表样本量, 误差线代表95%置信区间。

**Fig. 3** Weighted response ratio ( $RR_{++}$ ) of increasing (A) or reducing (B) precipitation on fine root and soil microbial biomass carbon under different duration of experiment. The variables are categorized into different groups depending on duration. The number in parentheses represents the sample size for each variable. Error bars represent 95% confidence intervals. MBC, soil microbial biomass carbon; RLD, root length density; SRL, specific root length.

( $\leq 1$  mm)和粗根( $\geq 10$  mm)(胡建忠等, 2005)。细根对降水变化的响应强于粗根, 降水变化导致土壤水分条件改变, 增加降水有利于更多的碳分配于构建根系, 进而导致细根生物量增加, 根长度密度减小, 提高水分运输率。减少降水则导致土壤水分短缺, 细根因生长变慢导致其生物量降低。Yuan和Chen (2010)在相关的meta分析中发现, 年降水量每增加100 mm, 北方森林乔木细根生物量以 $0.43 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的速率显著增加, 而本文研究只发现了北方森林乔木比根长显著增加。导致本研究以往研究存在差异的原因可能是, 细根生物量的变化并不能完全由降水变化解释, 也可能与树种或其他外界环境因素(比如氮沉降、温度升高等)有关。Liu等(2017)也在温带森林中发现单因素降水对乔木细根生物量的影响并不显著。Yuan和Chen (2010)对北方森林的研究从气候、物种、土壤性质以及林龄等4个方面进行, 本文仅从单因素降水变化分析北方森林乔木细根的变化, 可能因此产生差异。本研究中减少降水导致亚热带乔木、温带乔木和灌木细根生物量显著减少(图1B), 这与资源最优分配理论相悖, Hertel等(2013)指出水分亏缺对细根生物量的影响可能取决于植物碳水化合物供给是否充足, 当水分限制导致碳源受限时, 资源最优分配理论中的现象可能不会发

生。水分胁迫限制了新生根的生长, Chen等(2013)也指出干旱胁迫下的杉木幼苗会受到异速生长的抑制, 因此降水减少导致细根生物量的减少。而热带乔木细根生物量并没有受到降水减少的显著影响, 可能因为热带地区常年高温高湿, 部分抵消了降水减少的影响。

### 3.2 不同土层细根对降水变化的响应

土壤水分含量直接影响细根的垂直分布, 表现出生态位分离(Imada *et al.*, 2013), 细根生物量、比根长和根长度密度的分布表现出空间异质性(Jiang *et al.*, 2016)。本研究表明细根各指标对降水变化的响应也存在空间异质性, 20–40 cm土层的细根生物量对降水变化响应最显著, 可能因为该土层土壤养分和水分相对于0–20 cm的土层较贫瘠, 导致细根对降水的响应更加敏感(图2A)。本研究还发现增加或减少50%的降水时细根响应最强烈, 其中减少50%的降水使20–40 cm细根生产量显著减少, 而细根生产量降低非常不利于植物的生存。已有研究表明细根面临水分胁迫时采取的适应策略不一定完全表现在增加细根生物量或生产量, 可能依靠细根形态做出适应性变化(钟波元等, 2016), 本文研究结果与之一致, 即减少50%的降水显著增加了0–10 cm土层的根长度密度, 从而增大植物吸水表面, 减小

土壤输水距离,最大限度地获取水资源,这可能是土壤表层细根为应对深层细根生产量减少而做出的形态调整策略,因此分布在不同土层的细根对降水变化的响应可能存在形态或生理上的互补作用。因此,研究细根对降水变化的响应时,不但要研究细根形态和生理的响应,而且要研究细根不同土层对降水变化的响应是否有互补作用。

### 3.3 细根对降水变化实验持续时间长短的响应

在增加降水实验中,短期( $\leq 1$ 年)根长度密度显著增加,而1年以上的中期和长期根长度密度变化不显著(图3A),原因可能是短期实验中细根需要一定的适应稳定时间,细根通过提高密度以更多地吸收土壤中充足的水分,这有利于植物的正常生长。中、长期增水实验会导致土壤水分富足或过剩,细根不需要额外增加密度就可以吸收足够的水分以维持植物的生长。在长期减少降水实验中,细根生物量表现为显著下降,表明植物重新调整了地下碳分配策略,这与以往研究结果(Fiala *et al.*, 2012; Moser *et al.*, 2014)一致。本文长期降水变化显著影响细根生物量分配的结果表明:未来几十年或者更长时间内,降水变化对细根的影响会引起地下碳库的显著变化,进而影响全球碳循环。因此,探索细根对降水变化的响应时应更加注重长期实验,积极倡导长期定位观测,以增加控制实验的客观性和可信度。

### 3.4 降水变化对细根养分归还的影响

细根分解对土壤碳输入的年均贡献量高达50% (Vogt *et al.*, 1996),是一个有土壤微生物参与的复杂过程。Li等(2013)在降水增加实验中发现土壤微生物生物量碳显著增加,表现出较高的微生物分解能力,表明增加降水可提高土壤微生物活性,促进细根分解。有研究表明细根生物量对土壤微生物生物量碳质量分数的总贡献最大,土壤中绝大多数微生物菌群量受地下细根生物量的显著影响(林宇等, 2017; 罗达等, 2017)。增加降水既增加了细根生物量,又提高了土壤溶质的可用性,为土壤微生物提供了充足的底物资源,进而提高了土壤微生物对细根的分解能力,促使细根养分归还土壤。早期研究中也证明底物资源有效性直接影响土壤微生物活性,从而影响细根分解速度(Bloomfield & Vogt, 1993)。然而减少降水影响细根分解的机制还不确定, Martin等(2004)和Ostertag等(2008)都认为,降低土壤水分使微生物活性受限和底物转化能力降低而减弱根

降解。但García-Palacios等(2016)认为减少降水导致土壤微生物生物量的减少,反而促进细根分解。虽然本文减少降水导致土壤微生物生物量碳显著降低,但细根周转的变化并不显著,因此不能确定减少降水就增强或减弱了细根养分归还能力。

## 4 结论

(1)不同类型植物细根对降水变化的响应存在差异,灌木细根的响应强于乔木,缘于灌木浅层根系中细根所占比例高于乔木。(2)增加或减少50%的降水时细根响应最显著,细根各指标对降水变化的响应存在空间异质性,不同土层细根对降水变化的响应可能存在形态或生理上的互补作用。(3)长期( $\geq 3$ 年)降水变化显著影响细根生物量,而短期实验中细根通过形态适应以应对降水变化。(4)增加降水促进细根分解,加快细根养分归还进程,而减少降水对细根养分归还的影响尚未明确。

细根是土壤养分资源的重要来源,因此,研究降水变化对细根分解的影响为揭示生态系统养分循环对全球气候变化的响应具有重要意义。

致谢 长白山科学研究院开放基金(2016001)支持。

## 参考文献

- Ansley RJ, Boutton TW, Jacoby PW (2014). Root biomass and distribution patterns in a semi-arid mesquite savanna: Responses to long-term rainfall manipulation. *Rangeland Ecology & Management*, 67, 206–218.
- Bai W, Wan S, Niu S, Liu W, Chen Q, Wang Q, Zhang W, Han X, Li L (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.
- Berg B, McClaugherty C (2003). *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Springer, Berlin.
- Bloomfield J, Vogt DJ (1993). Decay rate and substrate quality of fine roots and foliage of two tropical tree species in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Plant and Soil*, 150, 233–245.
- Chang WJ, Guo DL (2008). Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forest in China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 1248–1257. [常文静, 郭大立 (2008). 中国温带、亚热带和热带森林45个常见树种细根直径变异. 植物生态学报, 32, 1248–1257.]
- Chapin FSI, Matson PAI, Mooney HA (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York.

- Chen G, Yang Y, Robinson D (2013). Allocation of gross primary production in forest ecosystems: Allometric constraints and environmental responses. *New Phytologist*, 200, 1176–1186.
- Chen MT, Zhao Z (2011). Effect of drought on root characteristics and mass allocation in each part of seedlings of four tree species. *Journal of Beijing Forest University*, 33(1), 16–22. [陈明涛, 赵忠 (2011). 干旱对四种苗木根系特征及各部分物质分配的影响. 北京林业大学学报, 33(1), 16–22.]
- Chen X, Zhang D, Liang G, Qiu Q, Liu J, Zhou G, Liu J, Zhou G, Liu S, Chu G, Yan J (2015). Effects of precipitation on soil organic carbon fractions in three subtropical forests in southern China. *Journal of Plant Ecology*, 9, 10–19.
- Coleman M (2007). Spatial and temporal patterns of root distribution in developing stands of four woody crop species grown with drip irrigation and fertilization. *Plant and Soil*, 299, 195–213.
- de Visser PHB, Beier C, Rasmussen L, Kreutzer K, Steinberg N, Bredemeier M, Blanck K, Farrell EP, Cummins T (1994). Biological response of five forest ecosystems in the EXMAN project to input changes of water, nutrients and atmospheric loads. *Forest Ecology*, 68, 15–29.
- Dong BF (2015). Root distribution characteristics of three kinds of forest lands in loess hilly region of northern Shaanxi. *Journal of Changjiang Engineering Vocational College*, 4, 24–26. [董宾芳 (2015). 陕北黄土丘陵区三种林地根系分布特征. 长江工程职业技术学院学报, 4, 24–26.]
- Fiala K, Tůma I, Holub P (2009). Effect of manipulated rainfall on root production and plant belowground dry mass of different grassland ecosystems. *Ecosystems*, 12, 906–914.
- Fiala K, Tůma I, Holub P (2012). Interannual variation in root production in grasslands affected by artificially modified amount of rainfall. *The Scientific World Journal*, 2, 805298. DOI: 10.1100/2012/805298.
- Ford CR, McGee J, Scandellari F, Hobbie EA, Mitchell RJ (2012). Long- and short-term precipitation effects on soil CO<sub>2</sub> efflux and total belowground carbon allocation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 54–64.
- García-Palacios P, Prieto I, Ourcival JM, Hättenschwiler S (2016). Disentangling the litter quality and soil microbial contribution to leaf and fine root litter decomposition responses to reduced rainfall. *Ecosystems*, 19, 490–503.
- Gei MG, Powers JS (2015). The influence of seasonality and species effects on surface fine roots and nodulation in tropical legume tree plantations. *Plant and Soil*, 388, 187–196.
- Han YY, Ye YH, Wang ZH, Wei LP, Lin L (2014). Root biomass, specific root length and root length density of *Sophora moorcroftian* in Tibet. *Journal of Northeast Forestry University*, 42(2), 39–41. [韩艳英, 叶彦辉, 王贞红, 魏丽萍, 林玲 (2014). 西藏砂生槐根系生物量、比根长和根长密度. 东北林业大学学报, 42(2), 39–41.]
- Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS (2008). The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 80, 1150–1156.
- Herzog C, Steffen J, Pannatier EG, Hajdas I, Brunner I (2014). Nine years of irrigation cause vegetation and fine root shifts in a water-limited pine forest. *PLOS ONE*, 9, e96321. DOI: 10.1371/journal.pone.0096321.
- Hertel D, Strecker T, Müller-Haubold H, Leuschner C (2013). Fine root biomass and dynamics in beech forests across a precipitation gradient—Is optimal resource partitioning theory applicable to water-limited mature trees? *Journal of Ecology*, 101, 1183–1200.
- Hu JZ, Zheng JL, Shen JY (2005). Discussion of root ecological niche and root distribution characteristics of artificial phyto-communities in rehabilitated fields. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 481–490. [胡建忠, 郑佳丽, 沈晶玉 (2005). 退耕地人工植物群落根系生态位及其分布特征. 生态学报, 25, 481–490.]
- Imada S, Taniguchi T, Acharya K, Yamanaka N (2013). Vertical distribution of fine roots of *Tamarix ramosissima* in an arid region of southern Nevada. *Journal of Arid Environments*, 92(3), 46–52.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y eds. *Climate Change in 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jerbi A, Nissim WG, Fluet R, Labrecque M (2015). Willow root development and morphology changes under different irrigation and fertilization regimes in a vegetation filter. *Bioenergy Research*, 8, 775–787.
- Jiang H, Bai Y, Du H, Hu Y, Rao Y, Chen C, Cai Y (2016). The spatial and seasonal variation characteristics of fine roots in different plant configuration modes in new reclamation saline soil of humid climate in China. *Ecological Engineering*, 86, 231–238.
- Kong DL, Lü XT, Jiang LL, Wu HF, Miao Y, Kardol P (2013). Extreme rainfall events can alter inter-annual biomass responses to water and N enrichment. *Biogeosciences*, 10, 8129–8138.
- Konôpka B, Lukac M, Andrea V (2012). Moderate drought alters biomass and depth distribution of fine roots in Norway spruce. *Forest Pathology*, 43, 115–123.
- Larsen KS, Jonasson S, Michelsen A (2002). Repeated freeze thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types. *Applied Soil Ecology*, 21, 187–195.
- Li YL, Yang FF, Ou YX, Zhang DQ, Liu JX, Chu GW, Zhang YR, Otieno D, Zhou GY (2013). Changes in forest soil properties in different successional stages in lower tropical China. *PLOS ONE*, 8, e81359. DOI: 10.1371/journal.pone.0081359.
- Lin Y, Hu HT, Qiu LJ, Lin SZ, He ZM, Zhang Y, Huang Z, Huang XY (2017). Microbial biomass and its influence factors in topsoil of three different plantations on a sandy coastal plain. *Journal of Northeast Forestry University*, 5,



- 85–90. [林宇, 胡欢甜, 邱岭军, 林思祖, 何宗明, 张勇, 黄政, 黄秀勇 (2017). 滨海沙地3种人工林表层土壤微生物量及其影响因素. *东北林业大学学报*, 5, 85–90.]
- Liu Y, Liu S, Wan S, Wang J, Wang H, Liu K (2017). Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition in a warm temperate oak forest. *The Science of the Total Environment*, 574, 1448–1455.
- Luo D, Liu S, Shi ZM, Feng QH, Liu QL, Zhang L, Huang Q, He JS (2017). Soil microbial community structure in *Picea asperata* plantations with different ages in subalpine of western Sichuan, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 519–527. [罗达, 刘顺, 史作民, 冯秋红, 刘千里, 张利, 黄泉, 何建社 (2017). 川西亚高山不同林龄云杉人工林土壤微生物群落结构. *应用生态学报*, 28, 519–527.]
- Martin PH, Sherman RE, Fahey TJ (2004). Forty years of tropical forest recovery from agriculture: Structure and floristics of secondary and old-growth riparian forests in the Dominican Republic. *Biotropica*, 36, 297–317.
- McClaugherty CA, Aber JD, Melillo JM (1982). The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 63, 1481–1490.
- McCormack ML, Dickie IA, Eissenstat DM, Fahey TJ, Fernandez CW, Guo D, Helmisaari HS, Hobbie EA, Iversen CM, Jackson RB, Leppälammil-Kujansuu J, Norby RJ, Phillips RP, Pregitzer KS, Pritchard SG, Rewald B, Zadworny M (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207, 505–518.
- Moser G, Leuschner C, Hertel D, Hölscher D, Köhler M, Leitner D, Michalzik B, Prihastanti E, Tjitrosemito S, Schwendenmann L (2010). Response of cocoa trees (*Theobroma cacao*) to a 13-month desiccation period in Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 79, 171–187.
- Moser G, Schuldt B, Hertel D, Horna V, Coners H, Barus H, Leuschner C (2014). Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian perhumid rainforest: Wood production, litter fall and fine root growth under simulated drought. *Global Change Biology*, 20, 1481–1497.
- Olesinski J, Lavigne MB, Krasowski MJ (2011). Effects of soil moisture manipulations on fine root dynamics in a mature balsam fir (*Abies balsamea* L. Mill.) forest. *Tree Physiology*, 31, 339–348.
- Ostertag R, Marín-Spiotta E, Silver WL, Schulten J (2008). Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico. *Ecosystems*, 11, 701–714.
- Starr G, Oberbauer SF (2008). Photosynthesis of Arctic evergreens under snow implications for tundra ecosystem carbon balance. *Ecology*, 84, 1415–1420.
- Taylor JP, Wilson B, Mills MS, Burns RG (2002). Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 387–401.
- Verbarg PS, Young AC, Stevenson BA, Glanzmann I, Arnone JA, Marion GM, Holmes C, Nowak RS (2013). Do increased summer precipitation and N deposition alter fine root dynamics in a Mojave Desert ecosystem? *Global Change Biology*, 19, 948–956.
- Vogt KA, Vogt DJ, Palmiotto PA, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H (1996). Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type, and species. *Plant and Soil*, 187, 159–219.
- Wu ZC, Wu FZ, Yang WQ, Wei YY, Wang A, Liu JL (2012). Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 4094–4102. [武志超, 吴福忠, 杨万勤, 魏圆云, 王奥, 刘金玲 (2012). 高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态. *生态学报*, 32, 4094–4102.]
- Yuan ZY, Chen H (2010). Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: Literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29, 204–21.
- Zhang JR, Zhang LY, Liu F, Yao B (2014). Research progress in effect of rainfall on soil microbe in arid and semi-arid area. *World Forest Research*, 27(4), 6–12. [张静茹, 张雷一, 刘方, 姚斌 (2014). 降雨对干旱半干旱地区土壤微生物影响研究进展. *世界林业研究*, 27(4), 6–12.]
- Zhong BY, Xiong DC, Shi SZ, Feng JX, Xu CS, Deng F, Chen YY, Chen GS (2016). Effects of precipitation exclusion on fine-root biomass and functional traits of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 2807–2814. [钟波元, 熊德成, 史顺增, 冯建新, 许辰森, 邓飞, 陈云玉, 陈光水 (2016). 隔离降水对杉木幼苗细根生物量和功能特征的影响. *应用生态学报*, 27, 2807–2814.]
- Zi H, Xiang Z, Wang G, Luji A, Wang C (2017). Profile of soil microbial community under different stand types in Qinghai Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(3), 21–32.

责任编辑: 白 娥 责任编辑: 王 威

## 附录I 数据分析的文献

## Supplement I The list of references associated with data

http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe2017.0203-S1.pdf

## 附录II 提取的原始数据

## Supplement II Extracted original data

http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe2017.0203-S2.xlsx

www.plant-ecology.com

扫码加入读者圈  
听语音, 看问答