

DOI: 10.5846/stxb201804020737

王晶, 赵文武, 刘月, 贾立志. 植物功能性状对土壤保持影响研究述评. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Wang J, Zhao W W, Liu Y, Jia L Z. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

植物功能性状对土壤保持影响研究述评

王 晶^{1,2}, 赵文武^{1,2,*}, 刘 月^{1,2}, 贾立志^{1,2}

1 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部, 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875

摘要: 植被对土壤保持具有重要的影响, 但是从植物功能性状的角度总结评述植被对土壤保持影响的研究并不多见。总结评述了植物地上功能性状、地下功能性状对土壤保持功能的影响以及植物地上、地下功能性状的关系, 认为: (1) 植被地上部分功能性状对土壤保持的作用主要体现在对溅蚀、面蚀的影响及间接改变土壤理化性质等方面, 其功能性状指标主要包括叶面积、叶长、叶宽、枝数、植被高度等; (2) 植被地下部分功能性状对土壤保持的作用主要体现在固持土壤、提高土壤抗剪切强度、提高土壤抗侵蚀能力、增强土壤渗透性, 植物根系固持土壤与根系抗拉能力密切相关, 植物根系土壤的物理和水文性质, 与细根比例、根长密度、根表面积等性状密切相关; (3) 可以通过植物地上部分功能性状间接反映地下部分功能性状, 但是现有研究多为定性认识; (4) 在植物功能性状对土壤保持的研究中亟待加强植被地上地下功能性状的长期定位监测, 深化植被功能性状尤其是根系特征与土壤保持的作用机理, 加强植被地上部分、地下部分功能性状的定量表达, 建立植被功能性状与土壤保持功能的定量关系, 实现植被功能性状与土壤保持功能特征的动态链接。

关键词: 植物地上功能性状; 植物地下功能性状; 土壤保持

Effects of plant functional traits on soil conservation: A review

WANG Jing^{1,2}, ZHAO Wenwu^{1,2,*}, LIU Yue^{1,2}, JIA Lizhi^{1,2}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Vegetation has an important influence on soil conservation; however, few studies have reviewed the impact of vegetation on soil conservation from the perspective of plant functional traits. In this paper, we summarized the impact of above-ground and underground functional traits on soil conservation and the relationship between aboveground and underground functional traits. We concluded that: (1) The aboveground vegetation functional traits mainly control soil erosion through the effects of splash erosion and surface erosion and indirectly by changing the soil physical and chemical properties. Its functional traits mainly include leaf area, leaf length, leaf width, branch number, and vegetation height, etc.; (2) The underground functional traits on soil conservation are mainly reflected in soil retention, soil shear strength improvement, soil erosion resistance enhancement, and soil permeability enhancement. Soil retention by plant roots is closely related to the tensile capacity of the roots. The physical and hydrological properties of plant roots are closely related to the fine root ratio, root length density, and root surface area, etc.; (3) Some aboveground functional traits of plants can indirectly reflect some of the underground functional traits, but existing studies are mostly qualitative; (4) In the study of plant functional traits on soil conservation, it is urgent to strengthen the long-term location monitoring of aboveground functional traits of vegetation, deepen our knowledge of the functional traits of vegetation, especially the mechanism of root characteristics on soil conservation, strengthen the quantitative expression of functional traits in the aboveground and

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501604) 和国家自然科学基金项目 (41771197)

收稿日期: 2018-04-02; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

underground parts of vegetation, and establish a quantitative relationship between vegetation functional traits and soil conservation functions. We must strive to achieve a dynamic link between vegetation functional traits and soil conservation functional characteristics.

Key Words: plant aboveground functional traits; plant underground functional traits; soil conservation

土壤侵蚀是全球普遍关注的生态环境问题之一。在气候变化与人类活动双重压力下,全球土壤保持功能退化、土壤侵蚀加剧^[1-2],人类生存和社会可持续发展面临严峻挑战。植被作为地球的重要生态屏障,能够调节土壤保持和侵蚀产沙^[3],在土壤侵蚀防治中发挥着极为重要的作用。植被可以通过不同方式影响土壤侵蚀:一方面,植物冠层通过拦截降雨和增加水分渗透和表面粗糙度来减少地表径流和侵蚀速率^[4]。另一方面,植被能够发挥拦截功能,阻挡泥沙运移,减少大规模的土壤流失^[5-6]。

在植被与土壤保持的关系研究中,植被类型和植被覆盖往往被看作是影响土壤侵蚀的重要指标;但是,植被对土壤保持的影响机理需要从植物功能性状角度来刻画。植物功能性状是指植物体具有的与其定植、存活、生长和死亡紧密相关的一系列核心植物属性,这些属性能够显著影响生态系统功能,反映植被对环境变化的响应^[7]。不同的植物功能性状和生态系统的特定功能密切相关。近年来,随着对植物功能性状研究的深入,学者们发现许多生态学问题都能够从植物功能性状角度得到较好的回答^[8-10]。对于土壤保持功能而言,植物形态特征(如植株高度、叶面积、根直径等)^[11-12]和生物力学性状(如根系抗拉强度)等对土壤侵蚀都有着显著影响^[13]。在已有植被与植物功能性状的综述研究中^[14-18],学者们往往侧重讨论不同植物功能性状间的关系以及植物功能性状随外界环境变化的特点,而针对植物功能性状与生态系统功能关系的综述相对缺乏。在植物功能性状与土壤保持的研究中,尽管有学者基于性状的方法来探索群落功能组成对土壤侵蚀过程的影响^[19],但是系统论述植物功能性状与土壤保持关系的研究并不多见。基于此,本文尝试从植物功能性状的地上部分、地下部分两个方面总结梳理植物功能性状对土壤保持的影响,进而深化植物功能性状-生态系统功能关系的认识和理解。

1 典型研究案例的收集

对世界范围内典型的研究案例进行了收集和总结,由表 1 和图 1 可知,世界范围内植物功能性状和土壤保持关系的研究相对较少,其中 40% 的研究区在中国,尤其是地上部分功能性状与土壤保持的关系,大部分集中在中国的亚热带地区和黄土高原。地下部分功能性状欧洲国家研究相对较多,其次是北美和亚洲地区。地上部分功能性状和地下部分功能性状关系的研究目前只收集到 2 项,分别为荷兰的莱茵河和德国。

2 植物地上部分功能性状对土壤保持的影响

植物地上部分不仅能够有效地拦截降雨,削弱雨滴击溅动能,而且能够增大坡面粗糙度减小径流速率。地上部分还能够通过影响土壤理化性质,进而影响土壤侵蚀,图 2 为植物地上部分功能性状的土壤保持机理图。

2.1 植物地上部分功能性状对溅蚀的影响

植被地上部分功能性状对溅蚀的影响主要体现在植被覆盖度、植被高度与植被枯枝落叶层。植被覆盖度主要由叶面积、叶长、叶宽及枝数决定。其中关于叶面积对溅蚀影响的成果相对较多^[20-22]。对乔木而言,植被覆盖度对土壤溅蚀的影响主要体现在植被林冠层对降水再分配。乔木林冠层可截留降雨,减弱雨滴动能,从而减小雨滴对表层土壤的击溅作用,进而减少土壤侵蚀。然而,植被覆盖度与叶面积的关系并不是叶面积越大植被覆盖度越大,降雨的截留作用越好。在江西新岗山区域,在叶面积低于 6700 mm²时乔木对降雨的截留作用最好^[20]。除林冠层外,例如林下灌木和草本层会对降雨进行二次截留,使到达地面的净雨量和雨滴

表 1 植物功能性状对土壤保持影响研究的典型案例

Table 1 Typical case study on the effects of plant functional traits on soil conservation

植物功能性状 Plant functional trait	主要影响途径 Influence path	植被类型 Vegetation type	研究区 Research area	文献 References	年限 Year
地上部分 Aboveground					
叶面积	截留	乔木	中国(亚热带)	Goebes P 等 ^[20]	2016
叶面积	截留	乔木、灌木、草本	巴西(桑托斯河口流域)	Almeida P 等 ^[21]	2014
叶面积、树高	截留	乔木	中国(东南亚亚热带)	Geißler C 等 ^[22]	2013
叶长、叶宽、叶面积	截留	乔木、草本	法国(阿尔卑斯山脉)	Burylo M 等 ^[25]	2012
树高、枝条数、叶面积、地径	截留、阻挡	乔木	中国(亚热带)	Goebes P 等 ^[26]	2015
树高、枝条数、叶长、叶宽、叶面积、地径	截留、阻挡	乔木	中国(亚热带)	Goebes P 等 ^[27]	2015
叶面积指数	截留	灌木、草本	中国(江西)	Zhang W T 等 ^[28]	2011
植被覆盖指数	截留	乔木、灌木、草本	中国(黄土高原)	Wen Z M 等 ^[29]	2010
叶面积、比叶面积	截留	草本	中国(岷江上游)	Xu X L 等 ^[30]	2008
叶面积	截留	农作物	尼日利亚(西南部)	Salako F K 等 ^[31]	2007
叶面积指数	截留	农作物	中国(云南)	Fan Z W 等 ^[32]	2016
叶面积指数	截留	农作物	中国(黄土高原)	Zhang J G 等 ^[33]	2015
叶面积指数	截留	所有类型	中国(黄土高原)	Zhang Y 等 ^[34]	2015
叶氮、叶磷、叶钾、叶碳	团聚体	农作物	中国(云南元江)	Duan X W 等 ^[37]	2017
叶氮、叶磷、叶钾、叶碳	团聚体	灌木、草本	伊朗(法尔斯东北部)	Ghazavi R 等 ^[38]	2011
根氮、根碳	团聚体	所有类型	马来西亚(金马伦高原)	Hashim G M 等 ^[41]	2005
根形态	力学	乔木	肯尼亚(西部)	Sigunga D O 等 ^[42]	2013
根系抗拉力	力学	草本	美国(密西西比州北部)	Simon A 等 ^[45]	2002
根系形态、根系抗拉力	力学	乔木	日本(札幌北海道)	Endo T 等 ^[46]	1969
根系形态、根系抗拉力	力学	乔木	美国(阿拉斯加威尔士王子岛)	Wu T H 等 ^[47]	1979
根系化学成分、分泌物	团聚体	农作物	法国	Traoré O 等 ^[54]	2000
根长密度、分泌物	力学、团聚体	农作物	比利时(鲁汶)	Gysels G 等 ^[56]	2006
根长密度、根有机质	力学、团聚体	乔木	中国(云南)	Fattet M 等 ^[57]	2011
根生物量	力学、团聚体	农作物	比利时	Knapen A 等 ^[58]	2010
根长密度	力学、团聚体	灌木、草本	瑞士(达沃斯)	Pohl M 等 ^[60]	2009
根长密度	力学、团聚体	农作物、草本	比利时	Gysels G 等 ^[69]	2003
根生物量	力学、团聚体	乔木、草本	西欧	Berendse F 等 ^[73]	2015
根生物量、根重密度	力学、团聚体	草本	荷兰(莱茵河)	Mommer L 等 ^[76]	2010
地上、地下结合 Relationship of aboveground and underground	力学、团聚体	草本	德国	Ravenek J M 等 ^[77]	2014

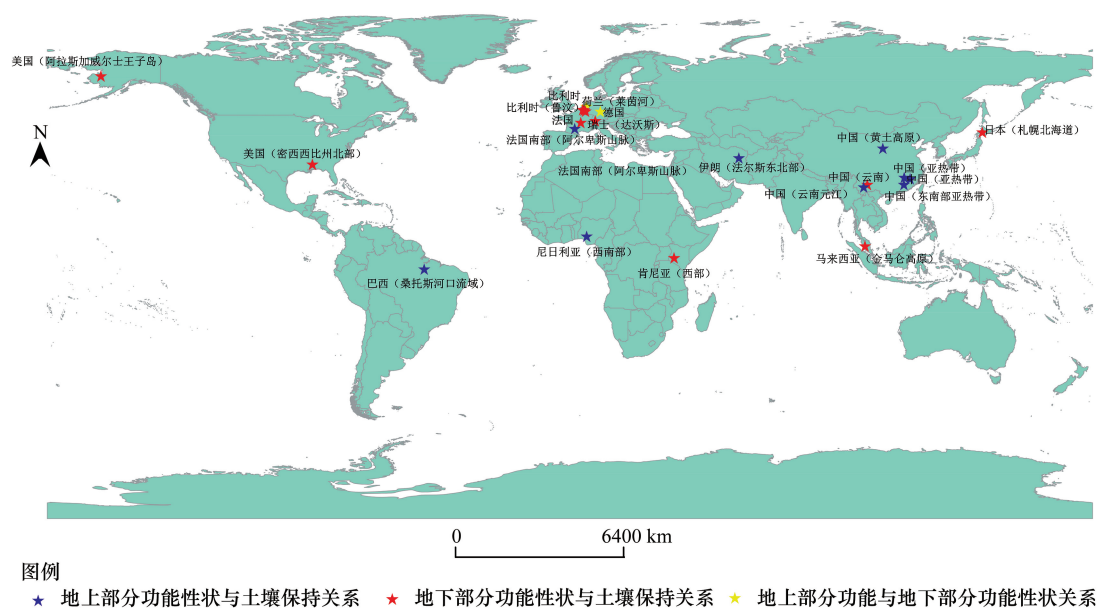


图 1 植物功能性状对土壤保持影响研究的世界案例区分布图

Fig.1 World case area map of studies on the effects of plant functional traits on soil Conservation

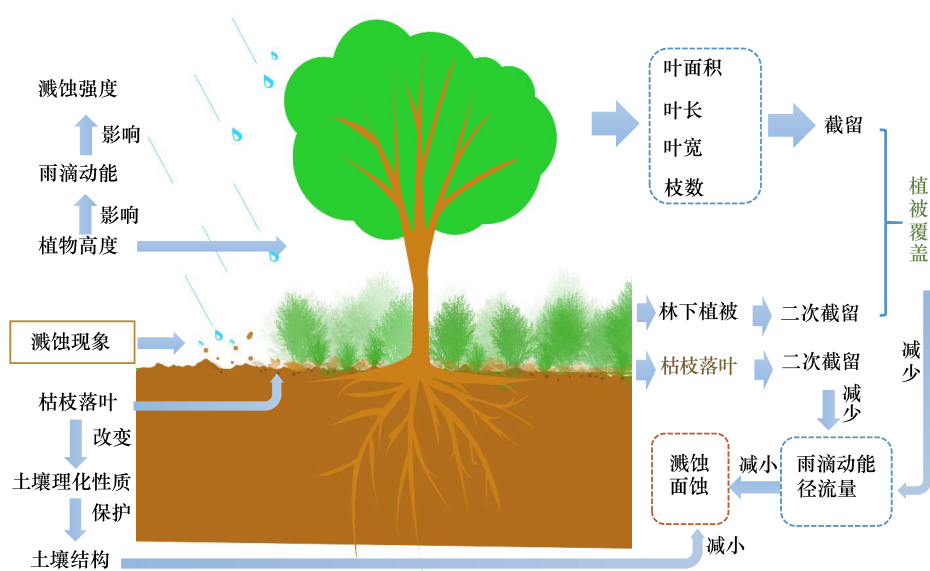


图 2 植物地上部分功能性状的土壤保持机理

Fig.2 Soil conservation mechanism of above-ground functional traits in plants

动能不断减少,大大降低了雨滴对表层土壤的击溅,进一步减少土壤侵蚀。截留量大小与林冠层郁闭度有着直接的关系,若林冠层郁闭度大,则林下植被稀少,截留量减少;若林冠层郁闭度小,则林下植被密集,截留量增大^[23-24]。叶片叶长、叶宽等叶片形态可以通过影响植被盖度,改变溅蚀的强度^[25];而枝条数量变化也能够影响溅蚀,而单一的树种群落对控制溅蚀更有效^[26]。

植被高度也会影响雨滴动能,只有在特定高度下,植被覆盖度才能有效减少雨滴能量。植被过高其冠层汇集的雨滴能量更大,对地表的溅蚀更强。在江西新岗山地区,树高低于 290 cm,枝下高低于 60 cm 时的控制溅蚀效果最佳^[20]。表明降雨侵蚀力不仅与叶面积、枝数和枝下高有关,而且和植物高度密切相关^[26-27],在植被恢复中可通过选择高度适当的树种来减轻当地的溅蚀。此外,植被枯枝落叶层覆盖在土壤表面,对降雨也

有一定的截留作用,能够保护土壤免受或减轻雨滴的直接打击以及对土壤的剥离,从而减少土壤侵蚀。

2.2 植物地上部分功能性状对面蚀的影响

植被地上部分功能性状对面蚀的影响主要体现在植被覆盖度和枯枝落叶层上。植被覆盖度主要由叶和枝决定^[28-31]。关于叶面积和面蚀的关系有相关农田作物的研究报道。例如,Fan 等^[32]研究玉米和马铃薯间作对面蚀的影响,结果表明,在坡地上,玉米和马铃薯间作可以减少地表径流和土壤蒸发造成的水分流失,从而增加土壤含水量,有助增加作物产量,与单独栽种玉米相比,玉米和马铃薯间作的径流量更低,这主要跟间作叶面积指数较高有关。Zhang 等^[33]运用降雨模拟器测量了两种作物(燕麦和小麦)在 15 种不同降雨强度下的径流量,结果表明径流量随着叶面积指数的增加而显著下降,因此,叶面积指数可有效地控制面蚀。另外,面蚀不仅受叶面积的影响,还会受降雨强度的影响,Zhang 等^[34]等结合 3 者间的关系进行了研究,分析了黄土高原中部沿着降水梯度叶面积的空间分布,结果表明,叶面积指数的空间分布在黄土高原由东南向西北降水沿梯度呈现下降趋势,与研究区平均年降水量的空间分布格局一致。在年降水量大于 550 mm 的区域,最佳植被覆盖率(由平均最大叶面积值给出)范围为 2.5—3.5,在 250—350 mm 范围,最佳植被覆盖范围为 0.8—1.5,在 35—550 mm 范围,最佳植被覆盖范围为 1.5—2.5。这些由最大叶面积指数得到的植被覆盖率在不同降水量区域的范围值有助于指导黄土高原的植被恢复。此外,植被枯枝落叶层也可以有效的拦截地表径流,减缓径流流速,从而减少泥沙运移,进而减小面蚀强度^[35]。

此外,植物地上部分也可以通过影响土壤理化性质,进而改变土壤保持功能。如枯落物能改善土壤肥力、保护土壤结构,具有显著的土壤保持作用^[36-38]。凋落物能截留降水,使水分缓慢入渗,提高土壤中的水分含量^[39];凋落物在土壤中不断地分解过程中,把大量的无机物输送到土壤中,枯枝落腐烂后还可增加土壤中有机的含量,提高土壤肥力,并且可促进土壤团粒的生成,改善土壤结构,提高土壤的抗侵蚀性;此外,地表结皮也能够改善土壤的理化性质,增强土壤的黏结力和抗侵蚀能力^[40]。

3 植物地下部分功能性状对土壤保持的影响

植物地下部分功能性状对土壤保持的作用表现为根系对土壤保持的影响,主要体现以下 4 个方面:一是通过根系在土体中交错、穿插固持土壤;二是提高土壤抗剪切强度;三是通过促进土壤团聚体的形成来提高土壤抗侵蚀能力;四是根能有效地增强土壤渗透性、减少径流,从而达到减少土壤侵蚀的目的。其中,前两个因素主要是从力学角度分析植物根系固持土壤的机制,后两个因素主要是指植物根系通过改善土壤的物理和水文性质,提高土壤抗冲性,以达到保持土壤的功能,图 3 为植物地下部分功能性状的土壤保持机理图。

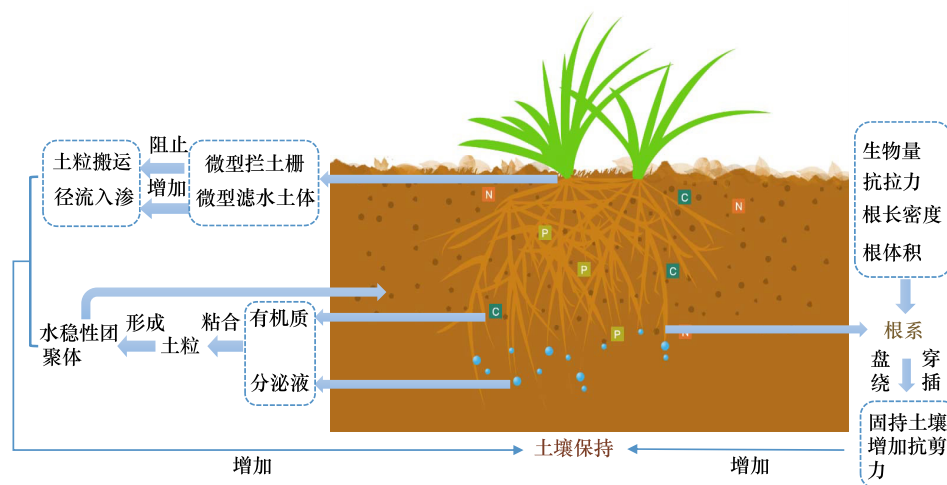


图 3 植物地下部分功能性状的土壤保持机理

Fig.3 Soil conservation mechanism of under-ground functional traits in plants

3.1 根系功能性状与土壤固持的力学机制

从物理结构上看,植物根系对土壤的盘绕固结作用,可以固持土壤,从而减少侵蚀^[41-42]。而相比于植被地上部分对溅蚀、片蚀的控制,植物根系对抵抗细沟浅沟侵蚀有显著作用。如在肯尼亚西部地区,柠檬桉树的根系由于紧密结合形成密集的网状结构,固定住大量土壤,从而可以有效阻挡水流的侵蚀及切沟形成^[42]。根系在土壤的穿插、缠绕过程中,对土壤抗剪强度也具有显著的增强效果,可以有效抵抗坡体浅层滑坡^[43]。土壤抗剪强度是土壤抗性的量度指标,其值越大,土壤边坡抵抗径流的剪切破坏能力也就越强^[44]。根系对土壤抗剪强度具有显著的增强效果,这主要是由于土体滑动时,根系受力拉直产生的抗拉力转变成根土复合体抗剪切能力^[45]。植物根系产生的土体抗剪强度的增量主要是与根系生物量、根系的平均抗拉强度、根面积、 $D \leq 5 \text{ mm}$ 径级的根长密度和根表面积密度等根系功能性状指标有关,且存在一定的正比关系。如在日本北海道札幌区域,土体的抗剪强度增量与根系生物量之间呈线性正比关系^[46];在墨尔本的斯旺斯顿区域,植物根系产生的土体抗剪强度的增量与根系的平均抗拉强度和根面积成正比^[47];在中国三峡库区,根长密度和根表面积密度,尤其是直径 $D \leq 5 \text{ mm}$ 径级的根长密度和根表面积密度能很好的表征土壤的抗剪强度,可作为评估土壤抗剪强度的重要参数^[48]。

3.2 根系功能性状与土壤团聚体

根系可以增加土壤水稳定性团聚体^[49-51]。在机械组织方面来说,根系在土壤基质中盘根错节形成框架,为水稳定性团聚体的形成创造基础条件。其次,根系的分泌液可以通过粘合性质将土壤颗粒结合在一起,从而进一步促进水稳定性团聚体的形成^[52-53]。根系对水稳定性团聚体的形成是一个长期的过程,根系对土壤抗蚀性的改善作用虽然在短时间内不明显,但是随着时间推移,其效果会越来越明显^[54-55]。不仅如此,团聚体的稳定性也会间接地受到以这些有机物质为食的微生物活性的影响,并进一步产生增强土壤团聚体形成的多糖^[56]。许多研究也证实根系的分泌物还可以作为增加土壤结构的有机物质的持续来源^[57]。土壤可蚀性指标与土壤的团聚体稳定性呈显著的负相关关系^[58-59],根系对水稳定性团聚体的改善作用是根系减少水蚀的一个重要原因^[60-61]。植物根系减少土壤可蚀性的能力随着根系以及根长密度的增加而增加。而在增加土壤水稳定性团聚体方面。 $\leq 1 \text{ mm}$ 根系的密度发挥重要的作用。根系提高土壤抗冲性的作用与有效根密度成正比^[62]。 $\leq 1 \text{ mm}$ 的须根量与水稳定团聚体数量呈显著的相关关系^[63-64]。须根增加土壤水稳定团聚体含量的原因主要表现为 3 个方面:(1) 须根的生理活性强,生长速率和死亡分解率快,死根可以提供有机质,而活根可以分泌有机酸,这二者都是促进土粒团聚体形成的胶结剂;(2) 须根对于土壤水分的吸收能力强,根系附近土壤水分的减少有利于水稳定团聚体的形成;(3) 主根衍生的须根分散在土壤中,可对土壤单体形成挤压作用,进而促进团聚体形成^[65]。

3.3 根系功能性状与土壤渗透性

根系对土壤渗透性有明显的改善作用,一方面根系通过穿插、网络及固结将土壤单粒粘结起来改善土壤的团粒结构和孔隙性,间接增强土壤渗透性;另一方面根与茎在其连接处形成微型拦土栅阻止土粒搬运,且沉积的土粒在连接处形成许多微型滤水土体,直接增加径流就地入渗。使土壤有良好团聚结构和孔隙状况^[66]。一般而言,细根对土壤渗透性能的改善作用尤为突出。细根($< 0.01 \text{ mm}$)和土壤渗透性间存在显著正相关,主要是因为细根可以促进水稳定团聚体的形成^[57]。渗透性增加会导致渗透率的增加,减少地表径流速率,从而控制侵蚀。土壤的初始入渗率、稳渗率、平均渗透率和渗透总量等各参数均随根系的根长密度、根表面积密度增大而增强,且呈现显著的线性关系;不同径级的根系特征与土壤渗透性的关系不同,根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于 $0.5\text{--}5 \text{ mm}$ 径级的根系,而根系径级过大或过小对土壤渗透性的增强作用都将减弱^[67-68]。

4 植物地上部分和地下部分功能性状间的联系

植物地上部分对土壤保持的影响已有很多研究,但越来越多的实验表明,根长密度、根重密度等地下功能

性状在减少土壤侵蚀方面可能更为重要^[69-73]。然而,无论是根长密度还是根重密度,对它们进行直接测量通常涉及大量的野外工作和破坏性采样^[74-75]。因此,学者们试图去研究植物地上部分和地下部分功能性状之间的关系,进而有助于刻画植物总体功能性状对土壤保持的影响。现有研究表明,随着物种丰富度增加,根长密度和根重密度也增加^[76-77],这种正相关关系表明,在研究土壤侵蚀时,物种丰富度可代替根的生物量。然而,仅仅依靠物种丰富度作为根生物量的替代指标并不可靠^[18],基于功能性状的方法表现出了更高的预测生态系统功能的能力^[78]。这是因为功能性状与生态系统功能和服务密切相关^[79]。使用易于测量的地上功能性状可能提供可靠信息来预测根长密度和根重密度。如在比利时斯凯尔特河沿岸区域,基于草地物种丰富度、功能多样性和功能组成等地上功能性状指标预测得到的根长密度值低于实际值,但是,仍然能够解释根长密度的大部分变化($R^2=69.9\%$),说明地上功能性状还是可以用于预测根长密度。目前,许多地上功能性状的数据已经公开使用^[81],但是有效刻画出地上和地下功能性状之间关系的研究并不多见^[80]。为了避免野外工作耗时和破坏性抽样,在未来的研究中亟待加强植物地上部分和地下部分功能性状间的相互关系研究。

5 结语

植被地上部分功能性状对土壤保持的作用主要体现在对溅蚀、面蚀的影响及改变土壤理化性质等方面。其中,植被地上部分功能性状对溅蚀的影响主要体现在植被覆盖度、植被高度与植被枯枝落叶层等方面,涉及到的功能性状指标包括叶面积、叶长、叶宽、枝数、植被高度等。植被地上部分功能性状对面蚀的影响主要体现在植被覆盖度和枯枝落叶层等方面,植被覆盖度主要由叶形态和枝数量决定。目前关于植被地上部分功能性状对土壤保持的影响研究,主要停留在短期内地上部分功能性状对土壤保持的影响上,缺乏长期连续的观测。因此,亟待加强植被地上部分的长期定位监测,同时增加不同类型植被和不同配置方式下的对比研究。此外,还需要系统分析植被地上部分通过枝叶、枯落物等引起坡面流分离而导致形态阻力增大的作用机制及其定量关系,以及通过枝叶削弱降雨打击作用而改变降雨阻力的定量关系,从而全面把握植物地上部分控制侵蚀的动力机制。

植被地下部分功能性状对土壤保持的作用主要体现在 4 个方面:一是通过根系在土体中交错、穿插,网络固持土壤;二是提高土壤抗剪切强度;三是通过促进土壤团聚体的形成来提高土壤抗侵蚀能力;四是根系能有效地增强土壤渗透性,减少径流,从而达到减少土壤侵蚀的目的。前两个因素主要是从力学角度分析植物根系固持土壤的机制,与根系抗拉能力和根系形态密切相关,而目前对根系形态的研究不足,亟待加强根系形态特征与土壤保持的作用机理研究。另外,目前已提出了纤维素含量是控制根系抗拉强度的主要因素,但对根系纤维素含量的测定仍无合适的方法,需进一步深化研究。后两个因素主要是考虑植物根系通过改善土壤的物理和水文性质,提高土壤抗冲性,以达到保持土壤的功能,与细根比例、根长密度、根表面积等性状密切相关。目前对于这部分的研究相对较多,但关于死根对土壤有机质含量、剪切力、水稳性团聚体、土壤抗蚀性等影响程度的研究,目前还基本处于空白。

关于植物地上部分和地下部分功能性状间的关系,目前研究多停留在定性的认识,亟待加强定量分析,相对于植物地上部分,地下部分的结构和功能存在显著的异质性;因此,在未来的研究中还需加强对地上部分功能性状和地下部分功能性状与土壤保持关系的对比研究,这对实现植被地上、地下功能性状与土壤保持功能特征的动态链接以及深入了解植被功能性状对生态系统功能的作用具有重要意义。此外,也需要解决植物地上部分和地下部分功能性状间关系的尺度转换问题,未来可尝试通过高分遥感、探地雷达等技术来推动该研究方向的发展。

参考文献 (References):

- [1] Bangash R F, Passuello A, Sanchez-Canales M, Terrado M, López A, Elorza F J, Ziv G, Acuña V, Schuhmacher M. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 246-255.

- [2] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, Green P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [3] Ito A. Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9): L09403.
- [4] Ligdi E E, Morgan R P C. Contour grass strips: a laboratory simulation of their role in soil erosion control. *Soil Technology*, 1995, 8(2): 109-117.
- [5] Descheemaeker K, Nyssen J, Poesen J, Raes D, Haile M, Muys B, Deckers S. Runoff on slopes with restoring vegetation: a case study from the Tigray highlands, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1/2): 219-241.
- [6] Abu Z M, Rudra R P, Lalonde M N, Whiteley H R, Kaushik N K. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips. *Hydrological Processes*, 2004, 18(11): 2029-2037.
- [7] Craine J M, Reich P B, Tilman G D, Ellsworth D, Fargione J, Knops J, Naeem S. The role of plant species in biomass production and response to elevated CO₂ and N. *Ecology Letters*, 2003, 6(7): 623-625.
- [8] De Baets S, Poesen J, Reubens B, Muys B, De Baerdemaeker J, Meersmans J. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(10): 1374-1392.
- [9] Burylo M, Dutoit T, Rey F. Species traits as practical tools for ecological restoration of marly eroded lands. *Restoration Ecology*, 2014, 22(5): 633-640.
- [10] Laughlin D C, Joshi C, Richardson S J, Peltzer D A, Mason N W H, Wardle D A. Quantifying multimodal trait distributions improves trait-based predictions of species abundances and functional diversity. *Journal of Vegetation Science*, 2015, 26(1): 46-57.
- [11] Messier J, McGill B J, Lechowicz M J. How do traits vary across ecological scales? A case for trait-based ecology. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 838-848.
- [12] de Baets S, Poesen J, Gysels G, Knapen A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 54-67.
- [13] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境和生态系统功能. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 150-165.
- [14] 冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用. *林业科学*, 2008, 44(4): 125-131.
- [15] 杨冬梅, 章佳佳, 周丹, 钱敏杰, 郑瑶, 金灵妙. 木本植物茎叶功能性状及其关系随环境变化的研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 702-713.
- [16] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325-339.
- [17] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应. *生态学报*, 2003, 23(2): 376-379.
- [18] Stokes A, Douglas G B, Fourcaud T, Giadrossich F, Gillies C, Hubble T, Kim J H, Loades K W, Mao Z, McIvor I R, Mickovski S B, Mitchell S, Osman N, Phillips C, Poesen J, Polster D, Preti F, Raymond P, Rey F, Schwarz M, Walker L R. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 1-23.
- [19] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [20] Goebes P, Schmidt K, Hardtle W, Seitz S, Stumpf F, Von Oheimb G, Scholten T. Rule-based analysis of throughfall kinetic energy to evaluate biotic and abiotic factor thresholds to mitigate erosive power. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2016, 40(3): 431-449.
- [21] Almeida P, Altobelli A, D'Aiuti L, Feoli E, Ganis P, Giordano F, Napolitano R, Simonetti C. The role of vegetation analysis by remote sensing and GIS technology for planning sustainable development: a case study for the Santos estuary drainage basin (Brazil). *Plant Biosystems: An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2014, 148(3): 540-546.
- [22] Geißler C, Nadrowski K, Kühn P, Baruffol M, Bruehlheide H, Schmid B, Scholten T. Kinetic energy of throughfall in subtropical forests of se China-effects of tree canopy structure, functional traits, and biodiversity. *PLoS One*, 2013, 8(2): e49618.
- [23] 魏强, 张秋良. 地表径流与土壤侵蚀研究进展. *中国水土保持*, 2008, (9): 30-33.
- [24] 景可, 王万忠, 郑粉莉. *中国土壤侵蚀与环境*. 北京: 科学出版社, 2005.
- [25] Burylo M, Rey F, Bochet E, Dutoit T. Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2): 135-144.
- [26] Goebes P, Seitz S, Kühn P, Li Y, Niklaus P A, von Oheimb G, Scholten T. Throughfall kinetic energy in young subtropical forests: investigation on tree species richness effects and spatial variability. *Agricultural and Forest meteorology*, 2015, 213: 148-159.
- [27] Goebes P, Bruehlheide H, Hardtle W, Kröber W, Kühn P, Li Y, Seitz S, von Oheimb G, Scholten T. Species-specific effects on throughfall kinetic energy in subtropical forest plantations are related to leaf traits and tree architecture. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0128084.
- [28] Zhang W T, Yu D S, Shi X Z, Wang H J, Gu Z J, Zhang X Y, Tan M Z. The suitability of using leaf area index to quantify soil loss under vegetation cover. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(4): 564-570.
- [29] Wen Z M, Lees B G, Jiao F, Lei W N, Shi H J. Stratified vegetation cover index: a new way to assess vegetation impact on soil erosion. *CATENA*, 2010, 83(1): 87-93.
- [30] Xu X L, Ma K M, Fu B J, Song C J, Liu W. Influence of three plant species with different morphologies on water runoff and soil loss in a dry-warm river valley, SW China. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4): 656-663.
- [31] Salako F K, Olowokere F A, Tian G, Kirchhof G, Osiname O. Ground cover by three crops cultivated on marginal lands in southwestern Nigeria

- and implications for soil erosion. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2007, 5(4): 497-505.
- [32] Fan Z W, An T X, Wu K X, Zhou F, Zi S H, Yang Y M, Xue G F, Wu B Z. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff. *Agricultural Water Management*, 2016, 166: 9-16.
- [33] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, N, Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 137-147.
- [34] Zhang Y, Huang M B, Lian J J. Spatial distributions of optimal plant coverage for the dominant tree and shrub species along a precipitation gradient on the central Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 69-84.
- [35] Vázquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, Hernández-Sandoval L, Parrot J F, Nearing M A. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *CATENA*, 2010, 80(3): 162-169.
- [36] Zheng H, Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H, Zhao T Q, Peng T B. How different reforestation approaches affect red soil properties in southern China. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(4): 387-396.
- [37] Duan X W, Han X, Hu J M, Feng D T, Rong L. A novel model to assess soil productivity in the dry-hot valleys of China. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(4): 705-715.
- [38] Ghazavi R, Vali A, Ghasemphassai R, Eslamian S. Soil physicochemical properties and vegetation pattern in an arid environment affected by a salt diaper. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(26): 5761-5768.
- [39] 张明忠, 朱红业, 沙毓沧, 张映翠, 金杰, 史亮涛, 龙会英, 纪中华. 金沙江干热河谷草被凋落物的分解率与持水性能. *水土保持研究*, 2010, 17(2): 156-159.
- [40] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 张国秀, 杨凯. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1316-1326.
- [41] Hashim G M, Wan Abdullah W Y. Prediction of soil and nutrient losses in a highland catchment. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2005, 5(1/2): 103-113.
- [42] Sigunga D O, Kimura M, Hoshino M, Asanuma S, Onyango J C. Root-fusion characteristic of eucalyptus trees block gully development. *Journal of Environmental Protection*, 2013, 4(4): 877-880.
- [43] 陈安强, 张丹, 熊东红, 刘刚才. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 108-113.
- [44] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 895-904.
- [45] Simon A, Collison A J C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(5): 527-546.
- [46] Endo T, Tsuruta T. The Effect of Tree Roots Upon the Shearing Strength of Soil. Sapporo, Japan: Annual Report of the Hok-kaido Branch, Forest Experiment Station, 1969: 167-182.
- [47] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [48] 李建兴, 何丙辉, 湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. *生态学报*, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [49] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2/3): 83-151.
- [50] Blanco-Canqui H, Lal R. *Principles of Soil Conservation and Management*. New York: Springer, 2008: 617.
- [51] Leifheit E F, Veresoglou S D, Lehmann A, Morris E K, Rillig M C. Multiple factors influence the role of arbuscular Mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 523-537.
- [52] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(7): 905-916.
- [53] Jones D L, Nguyen C, Finlay R D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2): 5-33.
- [54] Traoré O, Groleau-Renaud V, Plantureux S, Tubeileh A, Boeuf-Tremblay V. Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 575-581.
- [55] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1-12.
- [56] Gyssels G, Poesen J, Liu G, Van Dessel W, Knapen A, De Baets S. Effects of cereal roots on detachment rates of single- and double-drilled topsoils during concentrated flow. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(3): 381-391.
- [57] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, Ma W, Foulonneau M, Nespoulous J, Le Bissonnais Y, Stokes A. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength. *CATENA*, 2011, 87(1): 60-69.
- [58] Knapen A, Poesen J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(2): 217-228.
- [59] Wang J G, Li Z X, Cai C F, Yang W, Ma R M, Zhang G B. Predicting physical equations of soil detachment by simulated concentrated flow in ultisols (subtropical China). *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 37(6): 633-641.
- [60] Pohl M, Alig D, Körner C, Rixen C. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91-102.
- [61] Du Q, Zhong Q C, Wang K Y. Root effect of three vegetation types on shoreline stabilization of Chongming Island, Shanghai. *Pedosphere*, 2010,

- 20(6): 692-701.
- [62] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. Effectiveness of plant roots on increasing the soil permeability on the loess plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(20): 1735-1738.
- [63] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 王金锡. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(1): 45-49.
- [64] 陈士银, 黄月琼, 吴雪彪. 湿地松林根系对土壤抗侵蚀能力影响的研究. *西南农业大学学报*, 2000, 22(5): 468-471.
- [65] 沈晶玉, 周心澄, 张伟华, 李文忠, 李永良. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究. *中国水土保持科学*, 2004, 2(4): 87-91.
- [66] 王芝芳, 杨亚川, 赵作善, 邓健, 廖植樨, 刘军凤. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀能力的土壤力学模型. *中国农业大学学报*, 1996, 1(2): 39-45.
- [67] 闫东锋, 王德彩, 杨喜田. 丹江口库区不同植被类型地表根系对土壤渗透性的影响. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 35-44.
- [68] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 黄茹, 陶俊, 田太强. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响. *农业工程学报*, 2003, 29(10): 144-152.
- [69] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [70] Gysels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2005, 29(2): 189-217.
- [71] De Baets S, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 425-432.
- [72] Zhang G, Tang K, Ren Z, Zhang X C. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(3): 927-934.
- [73] Berendse F, van Ruijven J, Jongejans E, Keesstra S. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance. *Ecosystems*, 2015, 18(5): 881-888.
- [74] Lavorel S, Díaz S, Cornelissen J H C, Garnier E, Harrison S P, McIntyre S, Pausas J G, Perez-Harguindeguy N, Roumet C, Urcelay C. Plant functional types: are we getting any closer to the Holy Grail//In: Canadell J, Pitelka L F, Pataki D, eds. *Terrestrial Ecosystems in A Changing World*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 149-164.
- [75] Garnier E, Navas M L. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 365-399.
- [76] Mommer L, Van Ruijven J, De Caluwe H, Smit-Tiekstra A E, Wagemaker C A M, Joop Ouborg N, Bögemann G M, Van Der Weerden G M, Berendse F, De Kroon H. Unveiling below-ground species abundance in a biodiversity experiment: a test of vertical niche differentiation among grassland species. *Journal of Ecology*, 2010, 98(5): 1117-1127.
- [77] Ravenek J M, Bessler H, Engels C, Scherer-Lorenzen M, Gessler A, Gockele A, De Luca E, Temperton V M, Ebeling A, Roscher C, Schmid B, Weisser W W, Wirth C, De Kroon H, Weigelt A, Mommer L. Long-term study of root biomass in a biodiversity experiment reveals shifts in diversity effects over time. *OIKOS*, 2014, 123(12): 1528-1536.
- [78] Zhu H X, Fu B J, Wang S, Zhu L H, Zhang L W, Jiao L, Wang C. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1063-1072.
- [79] Kattge J, Díaz S, Lavorel S, Prentice I C, Leadley P, Bönsch G, Garnier E, Westoby M, Reich P B, Wright I J, Cornelissen J H C, Violle C, Harrison S P, Van Bodegom P M, Reichstein M, Enquist B J, Soudzilovskaia N A, Ackerly D D, Anand M, Atkin O, Bahn M, Baker T R, Baldocchi D, Bekker R, Blanco C C, Blonder B, Bond W J, Bradstock R, Bunker D E, Casanoves F, Cavender - Bares J, Chambers J Q, Chapin III F S, Chave J, Coomes D, Cornwell W K, Craine J M, Dobrin B H, Duarte L, Durka W, Elser J, Esser G, Estiarte M, Fagan W F, Fang J, Fernández - Méndez F, Fidelis A, Finegan B, Flores O, Ford H, Frank D, Freschet G T, Fyllas N M, Gallagher R V, Green W A, Gutierrez A G, Hickler T, Higgins S I, Hodgson J G, Jalili A, Jansen S, Joly C A, Kerkhoff A J, Kirkup D, Kitajima K, Kleyer M, Klotz S, Knops J M H, Kramer K, Kühn I, Kurokawa H, Laughlin D, Lee T D, Leishman M, Lens F, Lenz T, Lewis S L, Lloyd J, Llusià J, Louault F, Ma S, Mahecha M D, Manning P, Massad T, Medlyn B E, Messier J, Moles A T, Müller S C, Nadrowski K, Naeem S, Niinemets Ü, Nöllert S, Nüske A, Ogaya R, Oleksyn J, Onipchenko V G, Onoda Y, Ordoñez J, Overbeck G, Ozinga W A, Patiño S, Paula S, Pausas J G, Peñuelas J, Phillips O L, Pillar V, Poorter H, Poorter L, Poschlod P, Prinzing A, Proulx R, Rammig A, Reinsch S, Reu B, Sack L, Salgado - Negret B, Sardans J, Shiodera S, Shipley B, Siefert A, Sosinski E, Soussana J F, Swaine E, Swenson N, Thompson K, Thornton P, Waldram M, Weiher E, White M, White S, Wright S J, Yguel B, Zaehle S, Zanne A E, Wirth C. TRY-a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2905-2935.
- [80] Freschet G T, Swart E M, Cornelissen J H C. Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and below-ground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction. *New Phytologist*, 2015, 206(4): 1247-1260.