

植物生物力学特性在水土保持领域的研究进展与热点

温希望^{1,2}, 宋艳曦^{1,2}, 蔡崇法^{1,2}, 郝蓉^{1,2}, 郭中锋^{1,2}, 李佳颐^{1,2}

(1.华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2.农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] 植物生物力学特性是水土保持植物措施研究的重要内容, 在固土保水, 阻流拦沙等方面发挥着重要作用。利用 CNKI 和 Web of Science 数据库检索植物生物力学特性相关文献, 分析植物生物力学特性在水土保持研究领域的进展和未来发展趋势。[方法] 通过 Citespace 和 VOSviewer 软件对年发表论文数、热点期刊、主要研究国家、主要研究作者、关键词等进行可视化展示。[结果] 1990—2010 年植物生物力学特性在水土保持领域研究的发文量较少, 2010 年以后, 国内和国外的发文量都出现明显增长。在国际上, 美国发表论文章数位居首位, 中国发文量位居世界第二, 但研究成果的国际影响力还有待提升。国内形成了以胡夏嵩、格日乐、刘静、陈丽华为首的 4 大研究团队, 国际上目前尚未形成权威的大型团队。[结论] 国内研究主要聚焦于沙漠植物和坡面植物生物力学特性分析, 侧重于植物生物力学特性对其防风抗蚀作用的影响, 国际上对坡面植物根系加筋作用、沙漠先锋植物防风抗蚀作用、水生植物的衰减波浪的作用均进行了研究, 研究内容更加多元化。

关键词: 植物; 生物力学; 水土保持; Citespace; VOSviewer

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2023)04-0338-09

中图分类号: S157.1, G353.1

文献参数: 温希望, 宋艳曦, 蔡崇法, 等. 植物生物力学特性在水土保持领域的研究进展与热点[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 338-346, 355. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.039; Wen Xiwang, Song Yantun, Cai Chongfa, et al. Research progress and hotspots of biomechanical properties of plants in relation to soil and water conservation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 338-346, 355.

Research Progress and Hotspots of Biomechanical Properties of Plants in Relation to Soil and Water Conservation

Wen Xiwang^{1,2}, Song Yantun^{1,2}, Cai Chongfa^{1,2}, Hao Rong^{1,2}, Guo Zhongfeng^{1,2}, Li Jiayi^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan,

Hubei 430070, China; 2.Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in the Middleand

Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: [Objective] Biomechanical properties of plants are an important part of studies dealing with the use of plants for soil and water conservation because of the important role plants play in soil stabilization, water conservation, and water flow and sediment retention. The objective of this paper was to search the CNKI and Web of Science databases to find literature related to plant biomechanical properties in order to highlight the current status and development trend of biomechanical properties of plants related to soil and water conservation. [Methods] Citespace and VOSviewer were used to visualize the annual number of published papers, highly cited journals, primary research countries, primary research authors, keywords, etc. [Results] The number of publications on the biomechanical properties plants in the field of soil and water conservation was low during 1990—2010. After 2010, there was a significant increase in the number of both domestic and foreign publications. The United States ranked first in the number of papers published; China ranked third in the number of papers published. The international influence of research results needs to be improved. Four major research teams led by Hu Xiasong, Ge Rile, Liu Jing, and Chen Lihua have been formed domestically, but

收稿日期: 2022-10-19

修回日期: 2022-12-05

资助项目: 国家重点研发计划课题“水力侵蚀主导的复合侵蚀过程及其对耕地质量影响机理”(2021YFD1500703); 国家自然科学基金项目“三峡水库水土流失演变及成因分析和综合治理措施”(U2240222), “消落带土壤黑炭的降解及环境效应”(41877528)

第一作者: 温希望(1997—), 男(汉族), 江西省萍乡市人, 硕士研究生, 研究方向为生态修复。Email: xiwang@webmail.hzau.edu.cn.

通讯作者: 宋艳曦(1976—), 男(汉族), 山西省太原市人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文与水土保持研究。Email: songyt@mail.hzau.edu.cn.

no authoritative large team has been formed internationally. [Conclusion] Domestic research has mainly focused on the analysis of biomechanical properties of desert plants and slope plants, placing emphasis on the influence of plant biomechanical properties on windbreak and soil-fixing effects. International research has been more diversified, with studies conducted on the role of root reinforcement of slopes, the windbreak and erosion resistance role of desert pioneer plants, and the role of aquatic plants in wave attenuation.

Keywords: plant; biomechanics; soil and water conservation; Citespace; VOSviewer

水土流失会导致土地生产力下降,恶化生态环境,威胁人类社会的可持续发展,防治水土流失一直是世界各国共同关注的环境问题^[1-3]。植物措施是防治水土流失的主要措施之一,广泛应用于坡面和江河湖库堤岸防护^[4-7]。植物在江河湖库的岸滩和浅水区域广泛存在,承担着净化水质、加固堤岸等的重要作用。植物的水土保持作用可以追溯到宋嘉定年间(1208—1224年)魏岷的著作《四明它山水利备览》^[8],在20世纪90年代“植物生物力学特性”首次作为专有词被国际植物学家和工程师群体使用^[9-10],是生物物理学的分支。本研究认为,当前“植物生物力学特性”可以定义为植物各部分单独或整体,植物个体或群体表现出的力学特性,及其在水土保持上体现出的功能和作用,是衡量植物地下和地上部分与侵蚀营力(如水流、波浪、风力、冻融等)相互作用的重要参数集合,主要包括且不限于断裂力、断裂应力、断裂应变、断裂功、挠度、强度、刚度、弹性、韧性等参数,以及在外营力作用下,植物内在生理及结构变化所表现出的外在力学特性变化。植物生物力学特性这一专有词自出现后在水土保持领域的研究受到越来越多研究者的重视。植物地下部分在固土抗蚀方面起着重要的作用,植物的根系能提高土体强度从而抑制表层土体的侵蚀,根系的抗拉强度是影响表层土体稳定性主要因素之一^[11-13]。植物地上部分在拦截水流和风沙等方面发挥着重要作用,植物在水和风的作用下会发生弯曲和倒伏^[14-15],这种弯曲和倒伏的程度受到水流特性和植物自身的生物力学特性影响。植物在水流等的作用下弯曲和倒伏后自身的阻流面积发生变化^[16],又会反过来影响流场特性,影响水流和泥沙等的输移,形成复杂的植物—流场响应过程^[17-18]。植物地上部分和地下部分的生物力学特性在保持水土、防风固沙等方面起着无法替代的作用,植物生物力学特性研究是水土保持植物措施研究的重要基础。

Citespace等文献计量软件可以通过可视化的方式呈现研究领域的动态与进展^[19]。近年来,文献计量软件在水土保持和土壤侵蚀研究中已经被广泛地应用。例如,土壤侵蚀现状分析^[20]、国土生态修复^[21]、土壤有机碳矿化^[22]、生物土壤结皮^[23]、耕作侵蚀等^[24]。本文以最常用的两个文献计量工具 Citespace 和

VOSviewer对植物生物力学特性在水土保持研究领域的研究现状进行分析。拟通过分析发表论文数量、作者、热点期刊分布、关键词分析和研究热点演变,展示植物生物力学特性在水土保持研究领域的演变过程和发展方向,为该领域后续研究提供科学参考。

1 材料与方法

数据来源于中国知网(CNKI)和 Web of Science (WOS)核心合集数据库,检索日期截至2022年6月1日。CNKI数据库检索式为SU=(‘植物’+‘植被’+‘根系’+‘茎’+‘叶’)ANDSU=(‘力学特性’+‘生物力学’)。WOS数据库检索式为TS=((“biomechanical”OR“biomechanics”OR“mechanical properties”OR“mechanical traits”)AND(“plant*”OR“vegetation”OR“root*”)AND(“soil erosion”OR“soil loss”OR“sediment*”OR“floodplain”OR“riparian”OR“coast”OR“river”OR“lake”)),文献类型为“Artical”和“Review”,语言类型为“English”。结合人工筛选,剔除会议论文、书评等,得到“植物生物力学特性与水土保持”研究的中文文章112篇,英文文章162篇。

2 结果与分析

2.1 总体概况

年发文数量在一定程度上体现了该研究领域受关注的程度^[25]。通过对检索出的112篇中文文献和162篇英文文献统计分析,得出“植物生物力学特性与水土保持”研究主题每年的发文量变化趋势,结果如图1所示。中国对植物生物力学特性与水土保持研究的文献数量从1990—2005年仅有3篇。从2005年开始发文量呈不规则上升趋势,在2021年达到峰值(图1)。国际上关于植物生物力学特性与水土保持主题研究的发文量大致可以分为两个阶段:第一阶段为1991—2010年,该阶段植物生物力学特性与水土保持主题相关研究较少,受关注程度不高,20a内仅有22篇相关文献,占总发文量的13.6%;从2010年开始该主题研究受到了更多研究人员的关注,发文量出现明显的上升趋势(图1)。

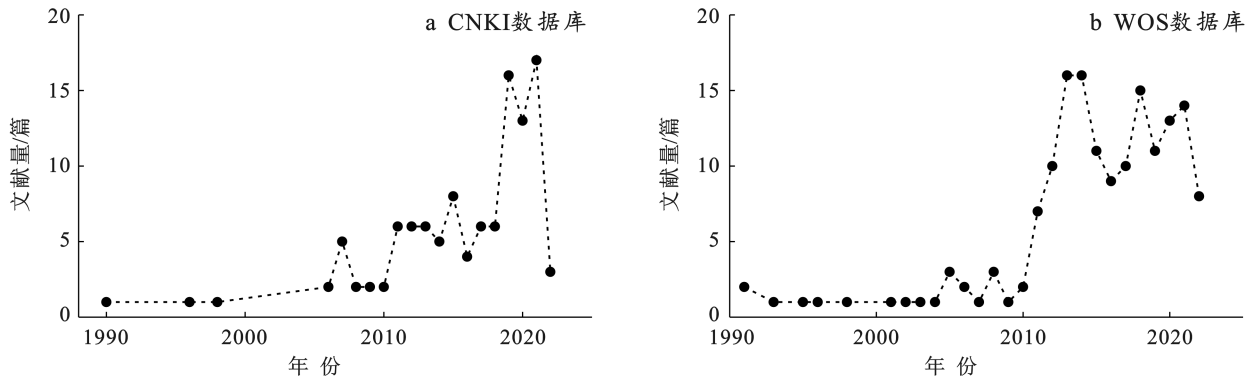


图 1 CNKI 和 WOS 数据库中相关研究年度发文数量

Fig.1 Annual number of papers in relevant research area based on CNKI database(a) and WOS database(b)

学术期刊是科研成果展示的重要平台和载体。CNKI 数据库中的 112 篇文献来自 53 个期刊,载文量大于 2 篇的期刊共 10 个(如表 1 所示)。载文量最高的期刊是《农业工程学报》,共发布 8 篇相关文献,占总发文量的 7.14%,篇均被引用率最高的期刊是《水土保持学报》,达 60 次。WOS 数据库中 162 篇文献共来自 88 个期刊,载文量大于 2 篇的期刊共 22 个(如表 2 所示)。文献发表期刊多集中于水利、生态、植物学等领域,从 1990 年至今载文量最高的期刊是《Journal of Hydraulic Research》,共发布 7 篇相关文献,占总发文量的 4.32%,篇均被引用率最高的期刊是《Earth Surface Processes and Landforms》,达 138 次。

表 1 CNKI 数据库中相关研究排名前 10 的期刊载文量
Table 1 Top 10 journals of published papers in relevant research area based on CNKI database

期刊	载文量	被引频次	平均被引频次
农业工程学报	8	503	30
水土保持学报	7	418	60
水土保持通报	6	194	32
内蒙古农业大学学报(自然科学版)	6	48	8
中国水土保持	5	122	24
水土保持研究	5	30	6
中国水土保持科学	4	77	19
西北林学院学报	4	55	14
生态学报	4	45	11
北京林业大学学报	3	66	22

表 2 WOS 数据库中相关研究载文量大于 2 的期刊

Table 2 Journals with over 2 published papers in relevant research area based on WOS database

期刊	载文量	被引频次	平均被引频次
Journal of Hydraulic Research	7	209	30
Ecological Engineering	6	84	14
Water Resources Research	5	129	26
Aquatic Sciences	5	193	39
Aquatic Botany	5	75	15
Freshwater Biology	4	100	25
Sustainability	4	10	3
Earth Surface Processes and Landforms	3	413	138
Industrial Crops and Products	3	213	71
Journal of Experimental Biology	3	191	64
Journal of Ecology	3	144	48
Journal of Hydrology	3	96	32
River Research and Applications	3	85	28
American Journal of Botany	3	81	27
Annals of Botany	3	81	27
Forest Ecology and Management	3	73	24
Environmental Fluid Mechanics	3	47	16
Catena	3	36	12
Polish Journal of Environmental Studies	3	27	9
Estuarine Coastal and Shelf Science	3	24	8
Water	3	18	6
Forests	3	16	5

机构发文量能展现科研机构在相关领域的研究成效。表 3 为 1990—2022 年 CNKI 数据库中发文量前 10 的团队,发文量排名前 4 位的是内蒙古农业大学沙漠治理学院(28 篇)、北京林业大学水土保持学院(14 篇)、青海大学地质工程系(11 篇)、水利部牧区水利科学研究所(9 篇)。其中内蒙古农业大学沙漠治理学院发文量名列前茅,在该领域中内蒙古农业大学科研实力较强。对发表相关文献的国家进行研究发现,在植物生物力学特性与水土保持研究领域中,美国学者在该领域发表文献数量最多,其次是中国和英国(表 4)。从发文量来看,中国发文量较高,但均篇文献引用率不高,约 13 次/篇,排名世界第 18 名。

表 3 CNKI 数据库中相关研究发文量前 10 的机构

Table 3 Top 10 institutions according to number of published papers with relevant research based on the CNKI database

机构	发文量
内蒙古农业大学沙漠治理学院	28
北京林业大学水土保持学院	14
青海大学地质工程系	11
水利部牧区水利科学研究所	9
中国科学院大学	5
神东煤炭集团环保管理处	5
贵州大学林学院	5
中国科学院青海盐湖研究所	4
山西农业大学资源环境学院	4
中国林业科学研究院亚热带林业研究所	3

表 4 WOS 数据库中相关研究发文量前 10 的国家

Table 4 Top 10 countries according to number of published papers with relevant research based on the WOS database

国家	发文量	总被引频次	平均被引频次
USA	31	1 001	32
China	27	310	11
England	25	1 059	42
Germany	18	570	32
France	18	331	18
Scotland	16	315	20
Switzerland	12	271	23
Italy	12	139	12
Netherlands	8	285	36
Poland	8	66	8

相关研究作者的发文量是研究人员在该领域生产力的表现,通过作者合作网络图谱可以发现该研究领域内科研实力较强的研究人员和团队。对国内研究团队分析发现,在植物生物力学特性与水土保持研究领域形成了胡夏嵩、格日乐、刘静、陈丽华为首的 4 大研究团队(图 2)。内蒙古农业大学沙漠治理学院形成了以刘静和格日乐为首的两大研究团队,且两个研究团队有一定的交流;青海大学地质工程系形成了以胡夏嵩为核心的研究团队,北京林业大学水土保持学院形成了以陈丽华为核心的研究团队。国内研究主要聚焦于植物根系力学特性对其固土作用的影响。

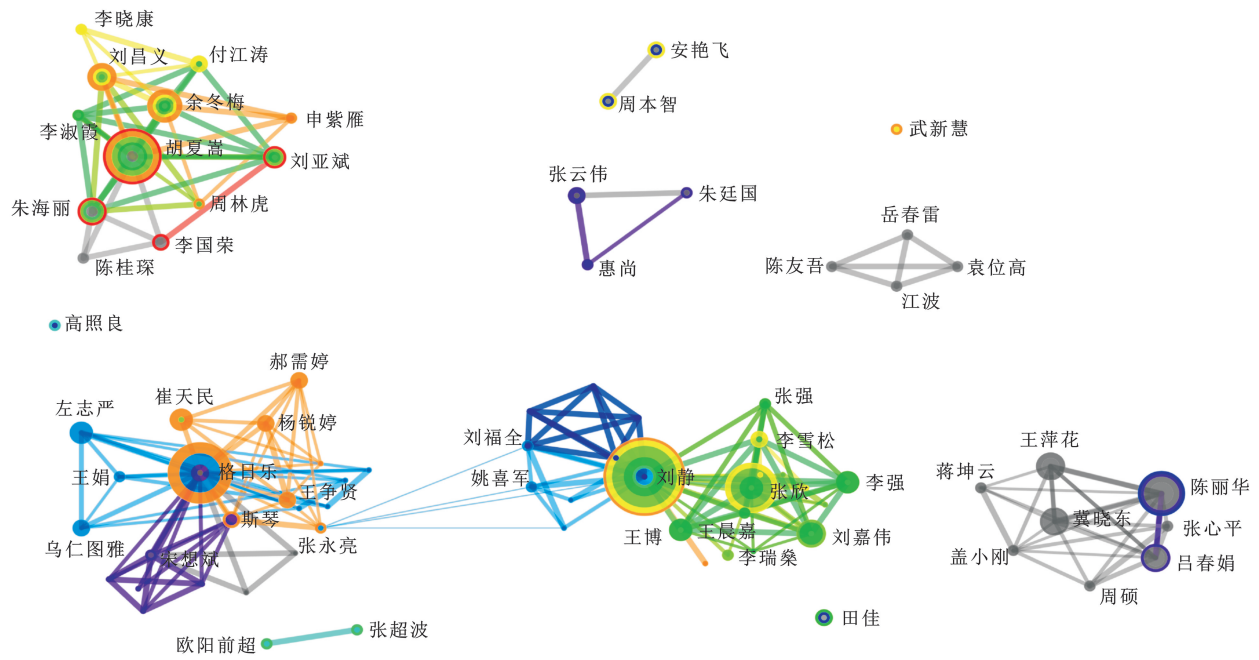


图 2 CNKI 数据库相关研究作者合作图谱

Fig.2 Network visualization of authors cooperation with relevant research based on CNKI database

国际植物生物力学特性与水土保持研究领域形成了以 Anna M. L., Gurnell A. M., Lee Jungtai, Ni Leyi, Sara P. 这 5 位作者为首的 5 个小团队, 但尚

未形成权威的大型团队。发文量前 3 的作者是 De Langre Emmanuel, Gurnell A. M., Anna M L, 均发表相关文献 6 篇(图 3)。

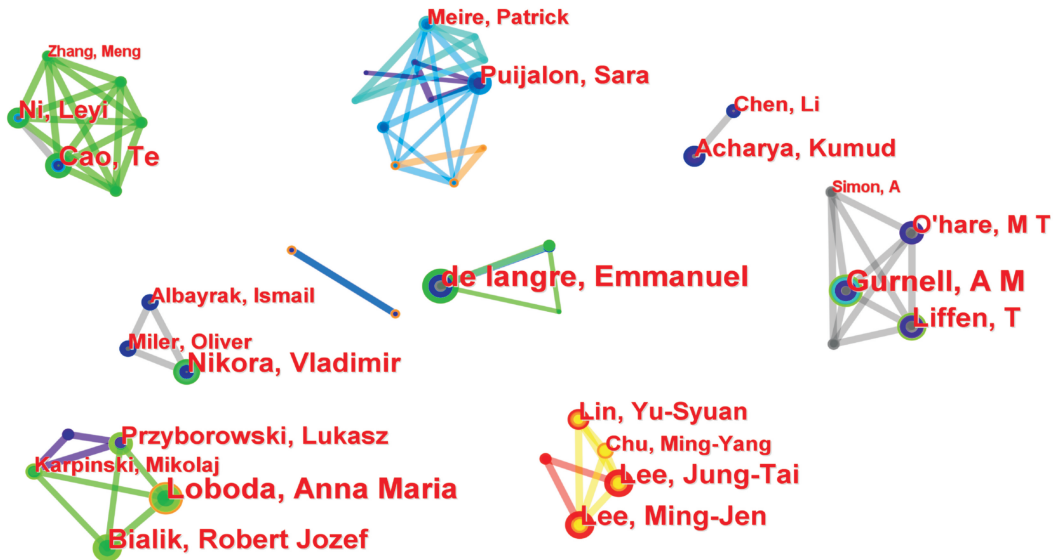


图 3 WOS 数据库相关研究作者合作图谱

Fig.3 Network visualization of authors cooperation with relevant research based on WOS database

2.2 研究热点分析

为了挖掘研究热点, 通过 VOSVIEW 软件设置关键词出现最小频次设置为 4, 出现次数大于等于 4 次的关键词进行共现分析(图 4—5)。其中圆节点越大, 表明关键词出现的次数越多, 研究领域受到的关注越多, 连线表示两个关键词的连接强度, 连线越粗表明两个关键词在同一篇文献中出现的频次更高。

在 CNKI 数据库关键词共现图中聚类 1 的核心词汇为弹性模量、枝条、极限抗拉强度等。该聚类研究主要内容是植物枝条的生物力学特性。植物地上部分的枝条等通过增加地表粗糙度、改变近地面流场从而削弱风对地表沙粒和土粒的侵蚀作用。植物枝条在风力作用下会产生弯曲变形, 植物枝条弯曲刚度越大, 承载能力越强, 随风沙摆动较小, 泥沙颗粒更容易沉降堆积, 因此植物自身的力学特性在风蚀研究中非常重要。格日乐等研究了常见防风固沙植物沙棘、柠条和白沙蒿等的枝条在不同加载速度、直径、水分影响下力学特性的变化^[26-27], 未来还需结合风洞试验和水槽试验进一步探究枝条生物力学特性变化对流场影响以及植物枝条对风力和水流变化的生物力学响应。

在 CNKI 数据库关键词共现图中聚类 2 的核心词汇为抗拉强度、植物根系、固土护坡、抗拉力等。该聚类研究内容主要是对植物根系抗拉特性进行了研究。土体中的植物根系通常会受到茎向弯力、茎向折

力、轴向拉力。国内研究人员认为植物根系在承受极限弯曲力时, 根系发生弯曲变形从而失去抗弯能力, 但并不会导致根系断裂。因此土体中植物根系主要是茎向折力和轴向拉力作用下发生断裂^[28-30]。植物根系抗拉和抗折强度越大, 对土体的锚固作用也更强, 抵抗土体下滑的能力越强, 能有效的增强边坡稳定性。目前国内研究人员对土体中植物根系的抗拉特性进行了大量的研究^[31-36], 从力学机理的角度为植物根系固土作用提供理论基础。但对于植物根系茎向折力的研究还比较少^[37-38], 应继续扩大植物根系抗折力数据库, 深入探究根系力学特性与其固土抗蚀作用的关系。

在 WOS 数据库中聚类 1 的核心词汇为河岸植被、边坡稳定、根系抗拉强度等。该聚类研究内容主要是植物根系形态特性和生物力学特性对边坡稳定的影响。植被作为生物工程措施来控制水土流失, 主要是由于植物根系可以通过锚定土层和改变水文特性来提高土壤抗剪强度, 从而防止滑坡等地质灾害事件的发生^[39]。例如 Pollen-Bankhead 等研究表明, Sparganium 的根系和地上部分都有较强的力学强度, 使它能够有效抵抗破坏和连根拔起^[40]。随着植物根系直径增加, 根的弹性和抗拉强度降低^[41]。不同物种根系的锚定能力和抗拉能力存在显著差异^[42]。季节变化对根系稳定边坡的能力也有影响。例如 Makarova 等^[43-44]研究表明, Beech 根系在 2 月的抗

拉力比 12 月强 15%~128%，该物种在春季对边坡的加固作用也更强。关于植物根系直径变化对生物力学特性的影响已经进行了大量的研究，但关于不同物种，以及时间和空间尺度的变化，对植物根系生物力学特性以及对边坡稳定的影响还需要进一步研究，构建更加完善的植物生物力学特性数据库，为坡面生态恢复提供理论依据。

在 WOS 数据库中聚类 2 的核心词汇为水生植物、柔性、拖曳力等。该聚类研究内容主要是大型藻类等水生植物的生物力学特性对水流结构的影响。研究表明，植物的弯曲刚度决定着植物在水流作

用下的重构，而植物的重构与其后方的尾迹长度^[45-46]和河流中的养分等的传递^[47-48]密切相关，植物弯曲变形越大阻流面积越小，有效拦截泥沙和其他物质的面积也减小。此外，有学者关注植物生物力学特性对水流作用的响应。相对于静水条件，在水流动力作用下，*Egeria densa* 的断裂力和抗拉强度显著升高^[49]；更靠近海滩的红树林，常年在风浪和水流作用下有更强的枝条强度，叶片更容易脱落，能更好地抵抗破坏力^[50]。未来研究应扩大常见水生植物的生物力学特性数据库，同时进一步关注植物生物力学特性变化对流场结构和泥沙沉积的影响。

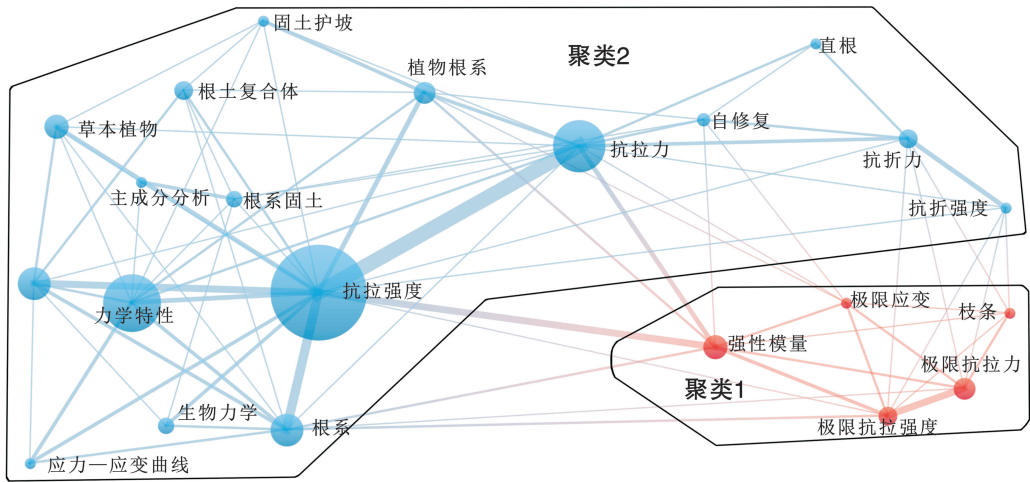


图 4 CNKI 数据库相关研究关键词共现图谱

Fig.4 Network visualization of keyword with relevant research based on CNKI database

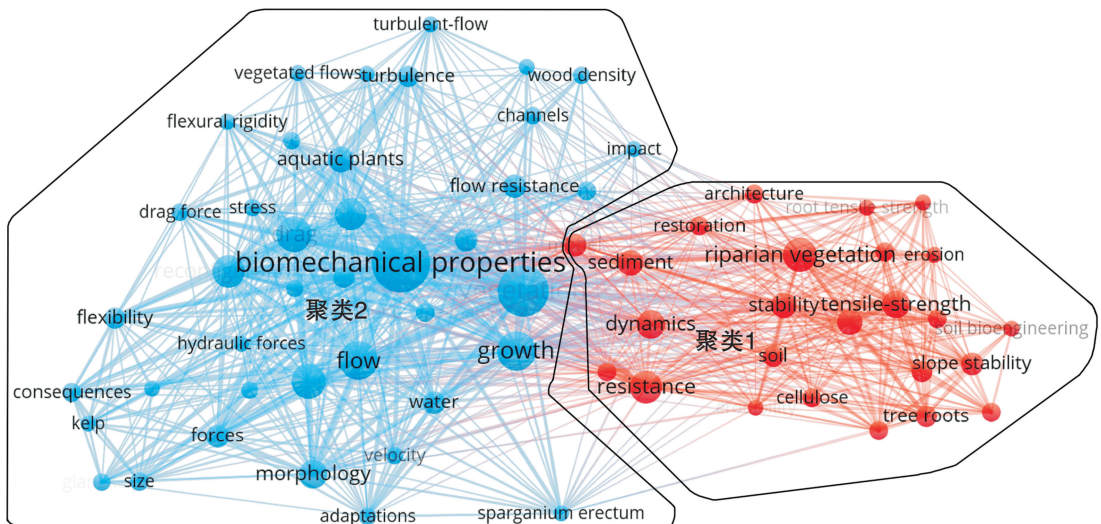


图 5 WOS 数据库相关研究关键词共现图谱

Fig.5 Network visualization of keyword with relevant research based on WOS database

2.3 研究热点演变

利用 Citespace 生成的突现关键词(图 6—7)，可以观察不同时间段内的研究前沿和热点。由于

CNKI 在 2007 年以前发文量较少，WOS 数据库在 2001 年以前发文量较少，因此在这两个时间点之前没有检测到突现关键词。

CNKI 数据库中,2007—2016 年突现关键词为抗剪强度、生物力学、抗拉强度、枝条、弹性模量、根系固土、草本植物、抗拉力。该阶段是研究植物根系及枝条抗拉特性与其保土固沙作用的重要时期^[51-55]。2017—2022 年突现关键词为直根和抗折力,表明研究人员不仅关注抗拉特性对根系断裂的影响,根系抗折特性也受到研究人员的关注^[29,38,56]。

WOS 数据库中,2001—2006 年突现关键词为后果(consequence),此时国际研究者比较关注不同环境条件下植物的力学性能,例如 Deane L 等^[67]分析了不同波浪条件下 4 种大型海藻的力学性能,该阶段是探索植物生物力学特性的初级阶段。2011—2016 年突现关键词为适应(adaptation)、重构(reconfiguration)、柔性(flexibility)、水流(flow)、模型(model)。在该阶段,国际研究者主要关注植物对水

流条件的生物力学响应,植物在水和风的作用下发生弹性重构,减少自身受到的阻力,避免局部断裂,增加在洪水或暴风等极端事件中存活的可能^[58-61]。2016—2022 年突现关键词为根系加筋(root reinforcement)、岸坡稳定性(slope stability)、沉积物(sediment)、阻力(resistance)。Andreoli 等分析了大粒径砾石基质和中等粒径泥沙基质中根系提供的附加黏聚力^[62],Lee 等^[63]通过风洞试验研究了 3 种沙丘先锋物种的根系生长特性、生物力学特性与抗风蚀能力的关系,Siniscalchi 和 Marjoribanks 等研究表明植物的弯曲刚度和重新配置是影响植被后方尾流沉积区长度的关键因素^[15,45]。该阶段国际研究者关注植物根系生物力学特性对岸坡和沙丘稳定的影响,同时植物生物力学特性在水流—植物—沉积物相互作用方面的影响也在被持续关注。

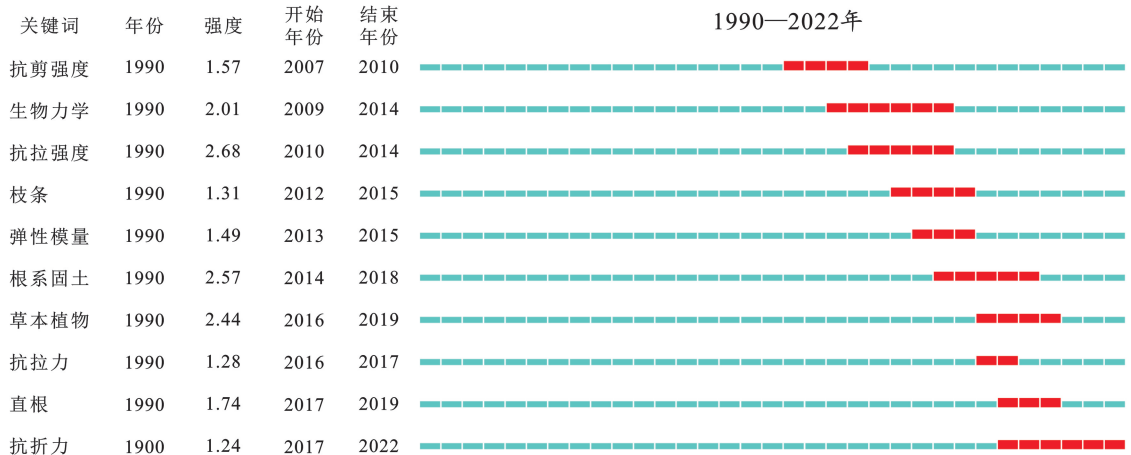


图 6 CNKI 数据库相关研究突现关键词图谱

Fig.6 Sudden emergence of keywords with relevant research based on CNKI database

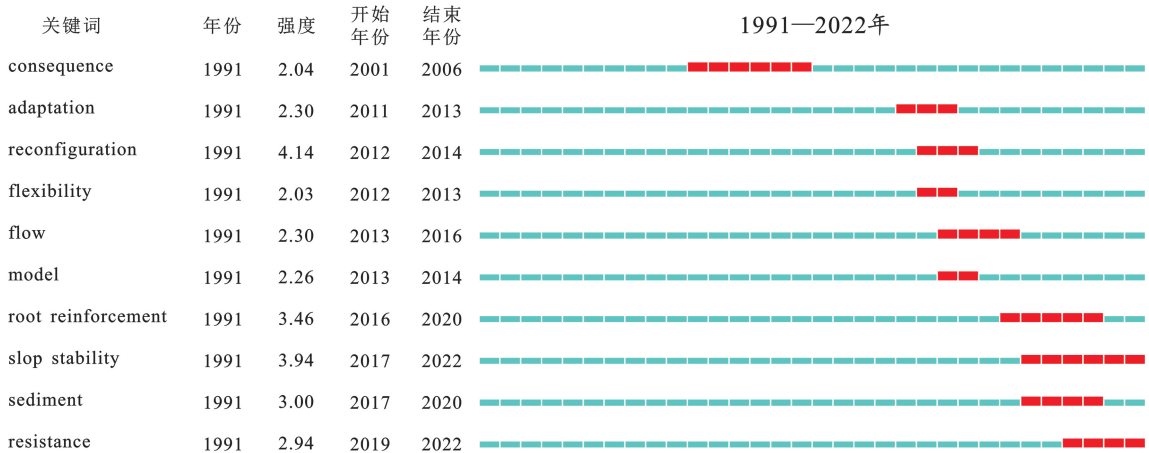


图 7 WOS 数据库相关研究突现关键词图谱

Fig.7 Sudden emergence of keywords with relevant research based on WOS database

3 结论

(1) “植物生物力学特性”这一专有词在 20 世纪 90 年代左右正式出现在文献中,此后在水土保持领域该主题的论文数量在总体上呈上升趋势,表明该领域的研究不论是在国内还是国际上都越来越受重视。

(2) 植物生物力学特性在水土保持领域研究中国内最有影响力的期刊是《农业工程学报》,国际上最有影响力的期刊是《Journal of Hydraulic Research》。国内内蒙古农业大学发文量位居首位,在该领域科研实力强劲,国际上美国发文量位居首位,中国发文量排名第二,但中国均篇文献引用率排名世界第 18 名,国际影响力有待提升。

(3) 国内研究热点主要聚焦于北方沙漠植物枝条和坡面植物根系力学特性的分析,当前中国南方红壤丘陵区降雨充足,在水力侵蚀主导的南方红壤丘陵区,植物措施是防治水土流失主要措施,未来还应加强南方坡面植物、河岸植物、水生植物生物力学特性与其阻流拦沙作用的关系。国际上在该领域的研究趋于多元化,从陡坡植物地下部分的固土抗蚀作用,到缓坡植物地上部分的阻流拦沙作用均进行了研究。

[参 考 文 献]

[1] 苏子龙,崔明,范昊明.基于东北漫岗黑土区坡耕地沟蚀防治的防护林带布局优化[J].应用生态学报,2012,23(4):903-909.

[2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003,29(4):437-450.

[3] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.

[4] 郑世清,文婕英,殷振江.黄土高原山坡生产型植物路防蚀机理与技术[J].水土保持研究,2005,12(5):95-97.

[5] 王峰,陈勇,周立江,等.三峡库岸带生态屏障建设技术体系初步研究:以云阳县盘龙镇示范区为例[J].水土保持通报,2011,31(1):122-127.

[6] 张含玉,方怒放,史志华.黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(13):3960-3968.

[7] 杨汉宏,张勇,郑海峰,等.不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响[J].水土保持通报,2017,37(4):6-11.

[8] 高志义.水土保持林学[M].北京:中国林业出版社,1996.

[9] Moulia B. Plant biomechanics and mechanobiology are convergent paths to flourishing interdisciplinary research [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64 (15): 4617-4633.

[10] Niklas K J. *Plant Biomechanics: An Engineering Approach to Plant form and Function* [M]. US: University of Chicago Press, 1992.

[11] Wang Xia, Hong Miaomiao, Huang Zheng, et al. Biomechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019,189:148-157.

[12] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.

[13] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.油松根系固土的基本力学特性[J].水土保持学报,2011,25(5):17-20,25.

[14] Kaj S J. Drag and reconfiguration of freshwater macrophytes [J]. *Freshwater Biology*, 2003,48(2):271-283.

[15] Siniscalchi F, Nikora V I. Flow-plant interactions in open-channel flows: a comparative analysis of five freshwater plant species [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5):1-13.

[16] Nepf H M. Flow and Transport in regions with aquatic vegetation [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012,44(1):123-142.

[17] Vettori D, Niewerth S, Aberle J, et al. A link between plant stress and hydrodynamics? Indications from a freshwater macrophyte [J]. *Water Resources Research*, 2021,57(9):1-15.

[18] Vettori D, Nikora V. Hydrodynamic performance of vegetation surrogates in hydraulic studies: a comparative analysis of seaweed blades and their physical models [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2020,58(2):248-261.

[19] Cheng C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57 (3): 359-377.

[20] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.

[21] 易行,白彩全,梁龙武,等.国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展[J].自然资源学报,2020,35(1):37-52.

[22] 史方颖,张凤宝,杨明义.基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J].土壤学报,2022,59(2):381-392.

[23] 郭忠录,蔡崇法.生物土壤结皮研究进展与热点:基于 CiteSpace 和 HistCite 计量分析[J].中国水土保持科学,2019,17(5):146-156.

[24] 袁正蓉,巨莉,李富程.基于 CiteSpace 方法的近 30 年耕作侵蚀学科动态可视化分析[J].水土保持研究,2021, 28(5):407-411.

[25] 郑梅迎,林伟,徐茜,等.基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J].土壤,2020,52(4):811-818.

[26] 左志严,格日乐,乌仁图雅,等.内蒙古中西部 3 种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J].水土保持通报,2015,35(2):52-57,63.

- [27] 格日乐, 斯琴, 刘俊宇. 6 种防风植物枝条生物力学特性及影响因素[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1333-1339.
- [28] 李有芳, 刘静, 张欣, 等. 外力作用下 4 种植物根系易损部位的研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 63-68.
- [29] 李雪松, 刘静, 王博, 等. 黑沙蒿直根的材料力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 353-358.
- [30] 王争贤, 格日乐, 郝需婷, 等. 水土保持先锋树种沙棘根系固土力学特性[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 36-39.
- [31] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 329-335.
- [32] 吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 69-78.
- [33] 徐海燕, 于卫洁, 王巧利, 等. 黄土丘陵沟壑区主要物种根茎力学特性[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 313-318, 324.
- [34] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157-166.
- [35] 苏雪萌, 刘俊娥, 周正朝, 等. 黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 259-264.
- [36] 徐文秀, 杨玲, 鲍玉海, 等. 大型水库消落带 2 种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 259-264, 272.
- [37] 格日乐, 郝需婷, 苏日娜, 等. 非生长期 6 种植物枝条的抗折力学特性[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 61-67.
- [38] 崔天民, 格日乐, 杨锐婷, 等. 内蒙古中西部 3 种典型乡土植物根系抗折力学特性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 138-143, 151.
- [39] Gurnell A. Plants as river system engineers: further comments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(1): 135-137.
- [40] Pollen B N, Thomas R E, Gurnell A M, et al. Quantifying the potential for flow to remove the emergent aquatic macrophyte *Sparganium erectum* from the margins of low-energy rivers [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1779-1788.
- [41] Li Yibo, Zhou Mingxin, Zuo Hongliang, et al. Root traits and mechanical properties of three shrubland species: implications for bioengineered slope stability [J]. Environmental Engineering Science, 2021, 38(12): 1176-1187.
- [42] Lee J T, Shih C Y, Wang J T, et al. Root traits and erosion resistance of three endemic grasses for estuarine sand drift control [J]. Sustainability, 2022, 14(8): 1-15.
- [43] Makarova O V, Cofie P, Koolen A J. Axial stress-strain relationships of fine roots of beech and larch in loading to failure and in cyclic loading [J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45(1/2): 175-187.
- [44] Cofie P, Koolen A J, Perdok U D. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems [J]. Soil & Tillage Research, 2000, 57(1/2): 1-12.
- [45] Marjoribanks T I, Lague D, Hardy R J, et al. Flexural rigidity and shoot reconfiguration determine wake length behind saltmarsh vegetation patches [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2019, 124(8): 2176-2196.
- [46] Przyborowski L, Loboda A M, Bialik R J, et al. Flow field downstream of individual aquatic plants: experiments in a natural river with *Potamogeton crispus* L. and *Myriophyllum spicatum* L. [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(9): 1324-1337.
- [47] Przyborowski L, Loboda A M. Identification of coherent structures downstream of patches of aquatic vegetation in a natural environment [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 1-12.
- [48] Ghisalberti M, Nepf H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2002, 107(C2): 3011.
- [49] Schoelynck J, Puijalon S, Meire P, et al. Thigmomorphogenetic responses of an aquatic macrophyte to hydrodynamic stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1-7.
- [50] Van Hespden R, Hu Z, Peng Y S, et al. Analysis of coastal storm damage resistance in successional mangrove species [J]. Limnology and Oceanography, 2021, 66(8): 3221-3236.
- [51] 胡晶华, 刘静, 李雪松, 等. 黑沙蒿根系抗拉特性及其与化学成分的相关性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 87-93.
- [52] 刘福全, 刘静, 姚喜军, 等. 根系固土主导力学因素与差异性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6306-6315.
- [53] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 192-198.
- [54] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3445-3452.
- [55] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40-46.
- [56] 王博, 刘静, 王晨嘉, 等. 半干旱矿区 3 种灌木侧根分支处折力损伤后的自修复特性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3541-3549.
- [57] Harder D L, Hurd C L, Speck T. Comparison of mechanical properties of four large, wave-exposed seaweeds [J]. American Journal of Botany, 2006, 93(10): 1426-1432.

- 域财政转移机制:基于耕地生态足迹与生态服务价值的实证分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(8):34-42.
- [11] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992,4(2):121-130.
- [12] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological Economics, 1997,20(1):3-24.
- [13] 安慧,范历娟,吴海林,等.基于BP神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1076-1087.
- [14] 马橙,高建中.森林生态补偿、收入影响与政策满意度:基于陕西省公益林区农户调查数据[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):58-64.
- [15] Rana A K, Alaa S, Ranin E A G. Analysis of ecological balance issue for the built-up land and cropland footprints in Alexandria City, Egypt during this time-series(2005-2019) [J]. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2020,15(6):911-920.
- [16] 刘利花,张丙昕,刘向华.粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J].农业工程学报,2020,36(19):252-263.
- [17] 刘某承,李文华,谢高地.基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J].生态学报,2010,29(3):592-597.
- [18] 郭慧,董士伟,吴迪,等.基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算[J].生态学报,2020,40(4):1405-1412.
- [19] 苏娇萍,李智国.基于改进生态足迹模型的云南省耕地可持续利用研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(1):124-131.
- [20] 洪顺发,郭青海,李达维.基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J].资源科学,2020,42(5):980-990.
- [21] 靳亚亚,柳乾坤,李陈.基于改进三维生态足迹模型的耕地承载力评价:以江苏省为例[J].中国土地科学,2020,34(9):96-104.
- [22] 许多艺,濮励杰,黄思华,等.江苏省耕地多功能时空动态分析及对耕地数量变化响应研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(3):575-587.
- [23] 王成,彭清,唐宁,等.2005—2015年耕地多功能时空演变及其协同与权衡研究:以重庆市沙坪坝区为例[J].地理科学,2018,38(4):590-599.
- [24] 苏浩,吴次芳.基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析:以黑龙江省克山县为例[J].中国土地科学,2020,34(9):77-85.
- [25] 叶文伟,王城城,赵从举,等.近20年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):114-126.
- [26] 崔宁波,生世玉.粮食安全视角下的东北黑土区耕地生态补偿研究[J].浙江农业学报,2021,33(9):1759-1769.
- [27] 王亚辉,李秀彬,辛良杰,等.耕地资产社会保障功能的空间分异研究:不同农业类型区的比较[J].地理科学进展,2020,39(9):1473-1484.
- [28] 李明琦,刘世梁,武雪,等.云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J].生态学报,2018,38(24):8822-8834.
- [29] 施开放,刁承泰,孙秀锋,等.基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究[J].生态学报,2013,33(6):1872-1880.

(上接第346页)

- [58] Barry G, Peter B, Bruno M. Review: wind impacts on plant growth, mechanics and damage [J]. Plant Science, 2016,245:94-118.
- [59] Harder D L, Speck O, Hurd C L, et al. Reconfiguration as a prerequisite for survival in highly unstable flow-dominated habitats [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2004,23(2):98-107.
- [60] Etnier S A, Vogel S. Reorientation of daffodil (*Narcissus*: Amaryllidaceae) flowers in wind: drag reduction and torsional flexibility [J]. American Journal of Botany, 2000,87(1):29-32.
- [61] Zhang X X, Nepf H. Flow-induced reconfiguration of aquatic plants, including the impact of leaf sheltering [J]. Limnology and Oceanography, 2020, 65(11):2697-2712.
- [62] Andreoli A, Chiaradia E A, Cislighi A, et al. Roots reinforcement by riparian trees in restored rivers [J]. Geomorphology, 2020,370:1-11.
- [63] Lee J T, Yen L Z, Chu M Y, et al. Growth characteristics and anti-wind erosion ability of three tropical foredune pioneer species for sand dune stabilization [J]. Sustainability, 2020,12(8):1-15.