



农业资源与环境学报

中文核心期刊

中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展

李强, 杨俊诚, 张加琼, 亢福仁, 高芸, 张正

引用本文:

李强, 杨俊诚, 张加琼, 等. 植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(1): 17–23.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0316>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[植物根系细胞抑制镉转运过程的研究进展](#)

赵艳玲, 张长波, 刘仲齐

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 209–213 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0011>

[东北黑土区水力侵蚀研究进展](#)

王计磊, 李子忠

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 389–397 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0328>

[豆科禾本科作物间作的根际生物过程研究进展](#)

姜圆圆, 郑毅, 汤利, 肖靖秀, 曾婕, 张可欣

农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 407–415 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0121>

[输变电工程对土壤环境的影响及其防控](#)

黄志元, 刘宝华, 崔星怡, 许杨贵, 汤泽平, 黎华寿

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 561–569 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0245>

[坡耕地不同种植模式对农田水土保持效应及土壤养分流失的影响](#)

马传功, 陈建军, 郭先华, 何晓彤, 祖艳群, 李元

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 72–79 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0170>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李 强, 杨俊诚, 张加琼, 等. 植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 17–23.

LI Qiang, YANG Jun-cheng, ZHANG Jia-qiong, et al. Progress of research on soil erosion resistance of plant roots and future prospects[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 17–23.

植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展

李 强^{1,2}, 杨俊诚^{1,3*}, 张加琼², 疆福仁¹, 高 芸¹, 张 正^{1,2}

(1.榆林学院/陕西省陕北矿区生态修复重点实验室,陕西 榆林 719000;2.中国科学院水利部水土保持研究所/土壤侵蚀与旱作农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要:植物根系能显著抑制土壤侵蚀过程,实现固土护坡目标。随着植被重建进程的加快,表征根系抗侵蚀的指标和模型研究日趋合理完善。其中,根系指标选取集中反映在根系的形态特征和空间特征,而模型构建侧重理论型模型探索与修正。本文在综述植物根系抗侵蚀形态特征和空间特征指标及模型的基础上,发现目前应用的根系表征指标不能很好地关联根系形态特征和空间连接特征在坡面土壤抗侵蚀中的综合效应。为此,提出了“根系构架”的新概念,以期为坡面土壤侵蚀与植被配置的关系研究及模型参数优化提供一定的参考。

关键词:根系;土壤抗侵蚀;表征指标;研究进展

中图分类号:Q944.3 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)01-0017-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0316

Progress of research on soil erosion resistance of plant roots and future prospects

LI Qiang^{1,2}, YANG Jun-cheng^{1,3*}, ZHANG Jia-qiong², KANG Fu-ren¹, GAO Yun¹, ZHANG Zheng^{1,2}

(1.Yulin University/Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin 719000, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau/Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planing, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Plant roots can significantly prevent soil erosion and aid in soil conservation and slope protection. With the rapid acceleration and advances in vegetation reconstruction the study of indicators and models of the root system's resistance to soil erosion is becoming increasingly reasonable and accurate, especially in the context of morphological and spatial characteristics of root systems. However, current characterization indexes cannot accurately capture and correlate the comprehensive effects of root morphological characteristics and spatial linkage characteristics with soil erosion resistance. Therefore, based on the review of morphological characteristics, spatial characteristics, and models of soil erosion resistance of plant root system, a new concept of "root framework" was proposed in this paper. This is expected to provide a new reference for the study of the relationship between soil erosion and vegetation allocation on slope lands.

Keywords: root system; soil erosion resistance; characterization index; research progress

植被根系与土壤形成根土复合体,在农业土壤资源化利用、植被恢复和生态环境建设中扮演着极为重要的角色。20世纪60年代,朱显谟^[1]先生指出,植被

根系通过缠绕、固结和串连土体等方式,形成较稳定的根土复合体,是强化土壤抗侵蚀的有效措施。根系抗水蚀方面,Gyssels等^[2]研究发现菊苣、甜菜和玉米

收稿日期:2018-11-14 录用日期:2019-04-12

作者简介:李 强(1986—),男,陕西子洲人,博士,副教授。主要从事土壤侵蚀及植被固土效应研究。E-mail:mr.li_qiang@163.com

*通信作者:杨俊诚 E-mail:jeyang@caas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41807521,41661101,41867015);国家重点实验室开放基金(A314021402-1801);陕西省青年科技新星人才计划项目(202057)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41807521,41661101,41867015); Open Program of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR(A314021402-1801); Shaanxi Youth Science and Technology Talent Program(202057)

根系可平均减少水蚀土壤流失量20%;Zhou等^[3]通过室内径流小区模拟研究方法,分析了黑麦草秸秆和根系对土壤侵蚀的相对贡献率,结果表明根系对坡面土壤流失量减少的贡献可达96%。根系抗风蚀方面,曹晓仪^[4]通过室内风洞模拟研究方法,发现含根土壤的抗风蚀效应平均为24.73%,根系密度越大,抗风蚀功效越好;另有研究较为系统地阐述了根系抗蚀作用的生物力学机制^[5-6]。在评价根系强化土壤抗侵蚀指标筛选方面有学者用根生物量、根长、根径、单位土壤截面积上直径≤1 mm须根的数量、根表面积密度等参数来表征根系对土壤抗侵蚀的增强效能^[7-10],还有研究基于分形理论,用根系分形维数、分枝率、分枝角度、拓扑结构等参数来描述土壤侵蚀与根系空间特征的关系^[11-12]。同时,根系抗侵蚀模型也得到了一定发展,李勇等^[13]建立了根系减沙效应与有效根密度之间的数学关系模型,刘国彬^[14]在此基础上将根系抗侵蚀的总效应分为根系网络串连、根土黏结和生物化学效应,并在上述模型中融入了生物化学因子,使得根系抗水蚀模型日趋完善。Wu等^[15]基于库伦定律,构建了根系固土的理论基础,即根系“加筋土理论”。在此基础上有学者发现根系受力后呈渐进破坏,并对模型进行了改进,形成了动态纤维束模型^[16-17]。而后Schwarz等^[18]发现含根土壤在剪切过程中根系存在逐渐断裂情形,并建立了根系固结土壤作用模型。为此,本研究筛选国内外关于根系抗侵蚀的表征指标,梳理其发展过程,并提出需要继续加强和优化的思路,以期为坡面土壤侵蚀与植被配置的关系研究及模型参数优化提供一定的参考。

1 根系抗侵蚀形态表征指标

植物根系能显著抑制土壤侵蚀过程,这种影响很大程度上取决于根系的形态差异^[19]。为了有效量化根系形态特征对土壤侵蚀及其过程的影响,一些根系特征参数诸如根系密度、生物量、根长、根长密度、根表面积密度、根系体积比等被用来表征土壤抗侵蚀功效与根系特征参数之间的关系,相关研究结果表明,土壤抗侵蚀能力随着上述根系形态特征参数的增大而呈指数函数降低^[20-23]。例如,Operstein等^[24]和Yang等^[25]指出地下根系生物量越大,分布越深,水土保持功效越强,其中,根系密度及其地下分布形态是影响根系抗侵蚀的主要因素。李勇等^[26]以油松人工林为研究对象,发现土壤抗侵蚀能力与根径≤1 mm的须根的密度呈极显著幂函数关系,并将土壤剖面中100

cm^2 截面上直径≤1 mm须根的个数认定为根系强化土壤抗侵蚀的有效根密度。当坡度≤20°时,油松根系抗侵蚀的有效根密度是每100 cm^2 60个,坡度>20°时,有效根密度则为每100 cm^2 118个。此外,De Baets等^[27]通过研究根系抗侵蚀效应发现,土壤流失率的大小与根密度和根径关系密切,并认为当根系生物量相当的条件下,根径越小,其减沙效应越好。刘国彬^[14]通过系统分析草地对土壤腐殖质和水稳定性团聚体的影响,认为毛根(根径0.1~0.4 mm)对土壤团聚体不仅可形成“缠绕、串连”效应,而且根土界面的黏结作用对土壤团聚体的形成也具有重要意义,并指出用1000 cm^3 土体中毛根的表面积来揭示根系强化土壤水稳定性结构的作用机制比用有效根密度或根系生物量更为科学。Li等^[28-29]和Zhang等^[30]则认为用单位土体中整个根系的表面积(根表面积密度)可更好地表征根系对土壤结构稳定性的增强效能。可见,评价根系抗侵蚀的形态指标较为丰富,但由于根长、根密度指标值易于获取,且代表性较强,根表面积密度较好地反映了含根土壤根土接触关系,使得这些指标在根系抗侵蚀研究中应用较为广泛。

2 根系抗侵蚀空间表征指标

在自然边坡植被恢复与重建过程中,不同植物根系之间通过串连作用,形成纵横交错的根网,将土壤颗粒紧紧束缚,能有效抑制坡面土壤侵蚀及其过程;在坡面土体内部,根系和土壤颗粒相互作用,形成根土复合体,增加了土体在侵蚀过程中的迁移阻力,有效强化了坡面土壤的抗侵蚀能力,增加了边坡的稳定性^[31-34]。目前有研究基于分形理论,用根系分支率、分支角度、交叉数、连接长度、分形维数、拓扑结构、根系面积比等参数来描述根系空间特征,但尚未将土壤侵蚀与这些参数紧密联系起来^[35-36]。例如,有研究发现,对固结土壤起主要作用的毛根在空间土体中具有强大的抗拉能力及弹性,这种抗拉能力足以抵抗坡面径流的冲刷力^[37]。Fan等^[38]较为系统地研究了土壤抗剪强度与H型、VH型、V型、M型和R型根系空间结构之间的关系,认为R型根系在增加土壤抗剪强度方面是最佳的,其次是V型根系。Schwarz等^[18]通过根系抗拔试验,发现植物根系分支点的数量及其空间分布是影响根系拔出力以及土壤抗侵蚀功效发挥的关键参数。可见,根系抗侵蚀评价的空间表征指标较多,如何把上述根系特征参数与土壤抗侵蚀研究紧密联系起来就显得尤为重要。

3 根系抗侵蚀模型

随着植物根系抗侵蚀研究的深入,关于坡面根系的减沙效应及有效性模型研究也得到了一定的发展^[13-14,39-40],但相关研究多集中在理论型模型,较少涉及数值型模型,同时根系的抗风蚀模型研究相对其抗水蚀研究较为滞后。

3.1 根系抗水蚀模型

根系的减沙效应指含根土壤相对于无根土壤的冲刷量减小的百分数,并认为它是确定植物根系强化土壤抗侵蚀有效性的重要指标。根系的减沙效应可以用来表征植物根系对土壤抗侵蚀能力的强化效应,其表达式如下:

$$\Phi = \frac{\text{含根土壤冲刷量(g)}}{\text{无根土壤冲刷量(g)}} \quad (1)$$

式中: Φ 为根系减沙效应系数。

李勇等^[13]在式(1)基础上,提出根系强化土壤抗冲性的有效性数学模型,如式2所示:

$$y = \frac{KR_d^B}{A + R_d^B} \times 100\% \quad (2)$$

式中: y 为根系的减沙效应,%; R_d 为有效根密度(个·100 cm⁻²); K 为根系减沙效应所能达到的最大值,%; A 、 B 为系数。刘国彬^[14]对该模型进行了较为系统的分析与评价,认为:①该模型中减沙效应 K “无根系土壤”用无植物根系的“农地土壤”或“黄土母质”来代表,这种无根土壤和含根土壤存在较大的差别;②植物毛根有极其强大的弹性和抗拉能力,在坡面发生侵蚀时,被根系缠绕串连的土粒发生流失,这可能不是毛根的断裂,而是根土分离造成的;③植物毛根多为具有生理活性的吸收性根,在其生长发育中能够分泌出大量的高分子黏胶物质,将土粒黏结保护,强化了土壤抗侵蚀能力。

基于上述分析,刘国彬^[14]将根系的抗侵蚀作用概括为根系串连、根土黏结和生物化学作用三类,将模型(2)中“有效根密度”用“有效根面积”来代替,这样较好地反映了植物毛根的串连效应和黏结效应,同时融入生物化学效应参数 C 。修正的根系减沙总效应数学模型为公式(3):

$$y = \frac{KS^B + C}{A + S^B} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C 为生物化学效应值,%; S 为有效根面积,cm²。当土壤中无根系时, $S=0$,则 $y=C/A$ 。当 $C=0$ 时,即参比土壤属同一植被时,公式(3)用于描述根系物理固结

效应。当 $C=0,S=0$ 时,即无根系存在时,根土黏结作用不存在,网格串连作用也没有,则减沙效应为0。模型(3)是基于草本根系的理论模型,对于乔木和冠木根系的抗侵蚀作用模拟结果还不理想,有待进一步研究^[28,30]。

3.2 根系抗风蚀模型

根系抗风蚀的研究相对其抗水蚀研究滞后,研究者更注重植物地上部分的风蚀防治作用。对根系,更关注风沙活跃环境中其适应环境的生长策略^[41-42]。前人常选用根系构型和根面积指标采取拓扑结构描述根系分布,具体采用的指标主要包括各级根系的直径、根长、分布深度,距离植株基部不同距离圆周内的根系生物量,各级根系的数量及内外连接的数量等^[43-45]。风蚀预测系统(Wind erosion prediction system, WEPS)在水文子模型(Hydrology submodel)中简单考虑了根系分布对土壤水分循环的影响,在作物子模型(Crop submodel)中考虑了作物生长过程中根系生物量及其占作物总生物量的比例变化,不同深度范围内的根系生物量分布及其比例,作物残余物降解子模型(Residue decomposition submodel)中建立了根系在微生物作用下主要受温度和土壤水分影响发生的分解作用,考虑作物根系和残余物降解对土壤的影响,最终使用侵蚀子模型(Erosion submodel)估算土壤风蚀量^[46]。

3.3 根系固土作用理论模型

植物对边坡的加固作用主要通过根系来实现。20世纪70年代,Wu等^[15]研究在假设①含根土壤土体与根系紧密接触,破坏方式均为断裂,②所有根系都垂直于直剪面,③所有根系受力同时被破坏的前提下,基于库伦定律,构建了根系强化土壤稳定性的先驱力学模型,即“加筋土理论”。然而,相关研究表明植物根系并非都垂直于直剪面,所有的根系受力时并非同时被破坏,Wu模型在上述三个假设的基础上,得出的数值高估了植物根系的固土效应,高估值可达150%^[17]。为此,1982年Gray等^[47]在Wu模型的基础上考虑了倾斜根系在土壤中的应力和位移的变化,提出了倾斜根系的固土模型;2005年Pollen等^[48-49]通过纤维模拟植物根系,发现含根土体中单根强度相加之和要比纤维束(模拟根)所承受的最大荷载值大得多,在剪切过程中根系逐渐断裂,并构建了动态纤维束模型。然而,这一模型在实践中又被发现存在同荷载重分配现象,即在低密度根系时高估了根系的固土作用,而在高密度根系时又低估了根系的固土能力,原

因是该模型认为在土壤受到剪切时所有的剪切力都转换为根系的拉力,且忽视了侧根固土效应。于是,2010年,Schwarz等^[50]提出了根束增强模型(Root bundle model, RBM)来评价根的增强效应。RBM是在纤维束模型(Fiber bundle model, FBM)的基础上,充分考虑根的强度、直径、长度、弯曲、分支以及土壤含水量、根土间的摩擦作用,是一个以位移控制加载过程的纤维束模型。可见,Schwarz的根束增强模型是目前考虑因素较为全面的根系固土理论模型,但该模型是基于乔木根系的理论模型,对于草本根系的固土功效模拟结果还不理想,有待于进一步研究。此外,Ekanayake等^[51-52]依据素土、根土复合体应力-应变关系曲线,提出了根系固土作用能量法模型。该模型以剪切过程中消耗的能量与根土复合体抗剪强度对应的关系为基础,视角独特,计算简便,但模型在含有较粗根系的土壤中以及根系处于潜在剪切面之上的情形,其计算精度较差,应用具有一定局限性。

综上所述,目前关于根系抗风蚀、抗水蚀针对性模型研究相对薄弱,但对根系固土作用理论模型研究较为系统。在实践中,植物根系在加固土壤时,除了重力外还会受到风力、水力等外营力作用的影响,当植物地上部分受到风(水)蚀荷载作用时,将会把荷载传递给根系,从而改变边坡土壤的应力与应变状态,影响边坡的稳定性^[53-54],故若模型能融合风力、水力等外界因素对根系加固土壤的作用,将对利用植物防治浅层滑坡和土壤侵蚀的生态工程提供重要的理论依据和实践指导。

4 结论与展望

植被根系与土壤形成根土复合体,具有深根锚固、浅根加筋的作用^[55]。植物根系对边坡土体的稳定性维持通常包括两方面:一方面,将根系看成类似于土钉的杆件直接加入土体中进行分析;另一方面,将含根土层看成根土复合体,用一个相当的增强层来代替含根土层而进行分析。通常来讲,植物根系形态对植被护坡具有直接作用,其形态不仅受植物品种的限制,而且还受到气候条件、土壤类型及边坡形态特征的影响,是一个复杂的动态系统^[56-57]。根系固土作用的准确模拟需要较好地反映根系形态和生长的模型^[58]。目前关于根系抗侵蚀针对性模型研究相对薄弱,且主要基于草本根系的理论模型,对于乔木和灌木根系的作用模拟结果还不理想,而根系固土作用模型(如根束增强模型)是基于乔木根系的理论模型,对

于草本植物根系的固土作用模拟结果还不理想,这使得根系固土作用模型中很难融合风力、水力等外界因素对根系加固土壤的作用,有待进一步研究。

在植被恢复与重建过程中,对于单一植被类型,根系构型(即同一植物根系中不同级别的根在生长介质中的相互连接情况和空间分布)是一个重要的表征指标。针对两种或两种以上的植被重建模式,不同植物根系之间通过分支连接的方式,与土壤极易形成根系的“根砧”构架(图1),其在坡面土体稳定性方面显得尤为重要,但根系构型的概念不能很好地表征这种结构特征和功能。因此,本研究提出“根系构架”的新概念,即两种或多种植物根系在土壤介质中通过分支连接、根土黏结及生物化学作用相互影响形成的根土耦合体。根系构架可通过根系形态特征(如根长密度、表面积密度等)与根系空间连接特征(根系交叉数、连接长度、分形维数、拓扑结构及根土接触面积等)两方面来表征。通常来讲,稳定的根系构架建立在不同植物根系之间的空间优化组配和有效融合的基础上。依据Yen^[59]提出的根系结构理论,即将根系形态结构分为V形根、VH形根、H形根、M形根和R形根(图2),本研究结合野外调研实践,在根系构架概念的基础上,初步提出稳定(VH+R或VH+M)、较稳定(VH+VH或R+M)、一般稳定(VH+V或VH+H)和较不稳定(V+V或H+H)4种根系构架水平,这对进一步研究如何将根系形态特征和空间连接特征指标融合起来、全面表征根系构架特征、形成可以量化的根系构架度等参数具有理论借鉴意义,也将有助于全面评价根系抗侵蚀功效。可见,根系构架是基于根系形态特征和空间特征来关联土壤抗侵蚀作用的,可以更为准确地表征“植被深根锚固、浅根加筋”的作用,

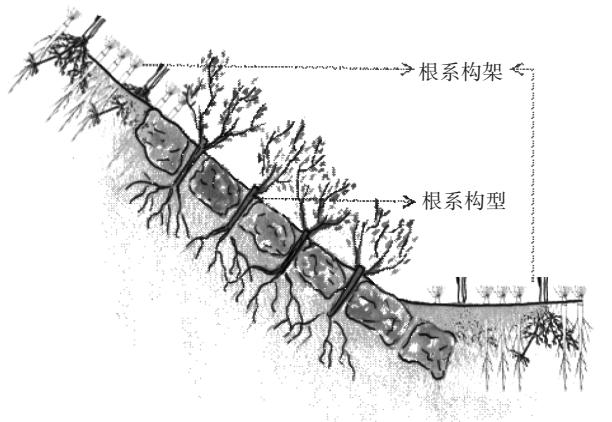


图1 根系构架假设图

Figure 1 Hypothesis diagram of root framework

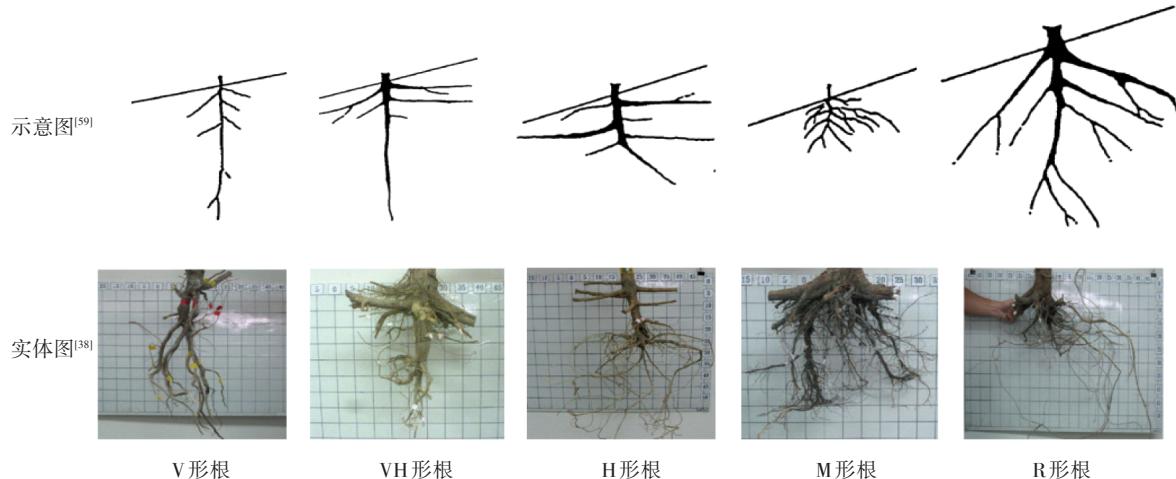


图2 根系构架稳定性示意图

Figure 2 Sketch of stability of root framework

对优化模型参数具有一定的参考价值,这可能是目前土壤侵蚀与植被配置关系研究的创新性思路之一。

参考文献:

- [1] 朱显模. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-120.
ZHU Xian-mo. Effects of vegetation factors on soil and water loss in the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1960, 8(2): 110-120.
- [2] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28: 371-384.
- [3] Zhou Z C, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2007, 70(3) : 350-355.
- [4] 曹晓仪. 根系抗风蚀性的风洞模拟研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2013.
CAO Xiao-yi. Wind tunnel simulation of wind erosion resistance of roots[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2013.
- [5] 刘福全, 刘静, 瑶珉, 等. 植物枝叶与根系耦合固土抗蚀的差异性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 411-418.
LIU Fu-quan, LIU Jing, NAO Min, et al. Species-associated differences in foliage-root coupling soil reinforcement and anti-erosion[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 411-418.
- [6] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [7] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. *Soil Science*, 1981, 132: 427-435.
- [8] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on the structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in the hilly Loess Plateau[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25 (6) : 757-764.
- [9] Schmidt S, Bengough A G, Gregory P J, et al. Estimating root-soil contact from 3D X-ray microtomographs[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(6): 776-786.
- [10] Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti-scourability enhanced by plant roots[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47: 676-682.
- [11] Smith D M. Estimation of tree root lengths using fractal branching rules: A comparison with soil coring for *Grevillea robusta*[J]. *Plant Soil*, 2001, 229(2): 295-304.
- [12] Wu T H. Root reinforcement of soil: Review of analytical models, test results, and applications to design[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50: 259-274.
- [13] 李勇, 徐晓琴, 朱显模. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 12-18.
LI Yong, XU Xiao-qin, ZHU Xian-mo. Plant roots and soil anti-scourability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 7(3) : 12-18.
- [14] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[D]. 北京:中国科学院, 1996.
LIU Guo-bin. Soil erosion resistance and its mechanism of grassland on the Loess Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [15] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [16] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. *Soil Science*, 1981, 132: 427-435.
- [17] Schwarz M, Cohen D, Or D. Soil-root mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: F04035.
- [18] Schwarz M, Cohen D, Or D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: F02007.
- [19] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 143-154.

- ZHANG Guang-hui. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(4): 143–154.
- [20] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. *Process in Physical Geography*, 2005, 29(2): 189–217.
- [21] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*Hordeum vulgare L.*) in contrasting soil environments[J]. *Plant Soil*, 2015, 395: 253–261.
- [22] Der G L, Bor S H, Shin H L. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 992–1006.
- [23] Osterkamp W R, Hupp C R, Stoffel M. The interactions between vegetation and erosion: New directions for research at the inter-face of ecology and geomorphology[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(1): 23–36.
- [24] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength [J]. *Ground Improvement*, 2000, 4: 81–89.
- [25] 杨 峰, 刘 立, 王文科, 等. 毛乌素沙地不同地貌下沙柳根系分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15582–15583, 15607. YANG Feng, LIU Li, WANG Wen-ke, et al. Distribution characteristics comparison of *Salix psammophila* roots under different landforms in Mu Us Desert[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39 (25): 15582–15583, 15607.
- [26] 李 勇, 吴钦孝, 朱显模, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究: I. 油松人工林根系对土壤抗冲性的增强效应[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 1–5. LI Yong, WU Qin-xiao, ZHU Xian-mo, et al. Study on intensification of soil anti-scourability by plant roots on Loess Plateau: I. The increasing effects of soil anti-scourability by the roots of Chinese pine [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1): 1–5.
- [27] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. *Plant Soil*, 2008, 305: 207–226.
- [28] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil[J]. *Catena*, 2017, 153: 61–65.
- [29] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Structural stability and erodibility of soil in an age sequence of artificial *Robinia pseudoacacia* in the hilly Loess Plateau, China[J]. *Polish Journal of Environment Studies*, 2016, 25: 1595–1601.
- [30] Zhang Z, Li Q, Liu G B, et al. Soil resistance to concentrated flow and sediment yields following cropland abandonment on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 17(6): 1–10.
- [31] 瞿文斌, 及金楠, 陈丽华, 等. 黄土高原植物根系增强土体抗剪强度的模型与试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 79–87. QU Wen-bin, JI Jin-nan, CHEN Li-hua, et al. Research on model and test of reinforcing shear strength by vegetation roots in the Loess Plateau of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12): 79–87.
- [32] Lv C J, Chen W G, Chen D, et al. Study on root distribution and mechanical properties of *Pinus tabulaeformis* in dumps of an opencast coal mine, Shaanxi, China[C]. The 2nd International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration, 2017: 263–267.
- [33] 吕春娟, 白中科, 陈卫国, 等. 黄土区大型排土场植被根系的抗冲抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 35–38. LÜ Chu-juan, BAI Zhong-ke, CHEN Wei-guo, et al. Study on anti-erodibility and anti-scourability of vegetation roots of large-stack pile in Loess area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (2): 35–38.
- [34] 李 强, 刘国彬, 张 正, 等. 黄土风沙区根系强化抗冲性土体模型的定量化研究[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(3): 99–104. LI Qiang, LIU Guo-bin, ZHANG Zheng, et al. Quantitative studies on root reinforcement resisting flow-induced erosion in the sandy loess region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(3): 99–104.
- [35] 张伟涛, 赵成章, 宋清华, 等. 高寒退化草地星毛委陵菜根系分叉数和连接长度的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8518–8525. ZHANG Wei-tao, ZHAO Cheng-zhang, SONG Qing-hua, et al. Trade-off between root forks and link length of *Potentilla acaulis* in degraded alpine grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8518–8525.
- [36] 陈伟立, 李 娟, 朱红惠, 等. 根际微生物调控植物根系构型研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5285–5297. CHEN Wei-li, LI Juan, ZHU Hong-hui, et al. A review of the regulation of plant root system architecture by rhizosphere microorganisms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5285–5297.
- [37] Zhao Y, Chai L J, Chen J, et al. Technology and application for ecological rehabilitation on self-maintaining vegetation restoration[C]. The 2nd International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration, 2017: 255–257.
- [38] Fan C C, Chen Y W. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36 (6): 813–826.
- [39] 朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 等. 基于植物生长过程的根系固土机制及Wu模型参数优化[J]. 林业科学, 2018, 54(4): 49–57. ZHU Jin-qi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, et al. Analyses on root reinforcement mechanism based on plant growth process and parameters optimization of Wu model[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54 (4): 49–57.
- [40] 吴 彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(2): 119–124. WU Yan, LIU Shi-quan, WANG Jin-xi. Effects of plant root system on soil anti-erosion[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, 3(2): 119–124.
- [41] 屈志强, 刘连友, 吕艳丽. 沙生植物构型及其与抗风蚀能力关系研究综述[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 357–362. QU Zhi-qiang, LIU Lian-you, LÜ Yan-li. Psammophyte architecture and its relations with anti-wind erosion capability: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2): 357–362.
- [42] Nicoll B C, Ray D. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions[J]. *Tree Physiology*, 1996, 16(11/12):

891–898.

- [43] 何明珠, 张景光, 王 辉. 荒漠植物枝系构型影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4):625–630.
HE Ming-zhu, ZHANG Jing-guang, WANG Hui. Analysis of branching architecture factors of desert plants[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(4):625–630.
- [44] 何维明. 不同生境中沙地柏根面积分布特征[J]. 林业科学, 2000, 36(5):17–21.
HE Wei-ming. Distribution characteristics of root area of *Sabina vulgaris* under different habitats[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(5): 17–21.
- [45] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems[J]. *New Phytol*, 1987, 106:61–77.
- [46] USDA. Wind erosion prediction system(WEPS) technical documentation[R]. Manhattan: US Department of Agriculture—Agricultural Research Service, Wind Erosion Research Unit, 1996.
- [47] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982.
- [48] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(7):226–244.
- [49] Pollen N, Simon A, Colloson A J C. Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on stream bank stability[M]//Bennett S J, Simon A. Riparian vegetation and fluvial geomorphol. Washington DC: American Geophysical Union, 2004: 125–139.
- [50] Schwarz M, Lehmann P D. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes: From a bundle of roots to tree stands[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35:354–367.
- [51] Ekanayake J C, Phillips C J. A method for stability analysis of vegetat-

ed hillslopes: An energy approach[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(6):1172–1184.

- [52] Ekanayake J C, Phillips C J. Slope stability thresholds for vegetated-hillslopes: A composite model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(4):849–862.
- [53] Fan C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils[J]. *Plant Soil*, 2012, 355(1/2): 103–119.
- [54] 田 佳, 曹 兵, 及金楠. 植物根系固土作用模型研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21):209–219.
TIAN Jia, CAO Bing, JI Jin-nan. Research progress of root reinforcement models[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(21): 209–219.
- [55] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, et al. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61 (Part C):646–657.
- [56] Yan R, Zhang X P, Yan S J, et al. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. *International Soil & Water Conservation Research*, 2018, 6(1):13–22.
- [57] Pournader M, Ahmadi H, Feiznia S, et al. Spatial prediction of soil erosion susceptibility: An evaluation of the maximum entropy model [J]. *Earth Science Informatics*, 2018, 11(3):1–13.
- [58] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. *Catena*, 2018, 166:192–199.
- [59] Yen C P. Tree root patterns and erosion control[C]//Jantawat S. Proceedings of the international workshop on soil erosion and its countermeasures. Bangkok: Soil and Water Conservation Society of Thailand, 1987:92–111.