

怪柳对盐碱地生态环境的影响

Effects of *Tamarix* on ecological environment of saline-alkali soils

何秀平, 王保栋, 谢琳萍

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

中图分类号: P745 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)01-0096-06

doi: 10.11759/hyxx20130717001

怪柳是一种盐生植物, 具有很强的耐盐、抗旱、耐淹的生物学特征, 广泛分布在内陆盐碱地和我国北方滨海湿地、滩涂, 有“南有红树, 北有怪柳”之说。怪柳是典型泌盐盐生植物, 在盐碱地(含滨海湿地)种植形成怪柳林, 不仅可以显著提高其物质生产、能量转换、气候与水分调节、水质净化、生物多样性保育、防风固沙/护堤等生态与环境功能^[1-2], 而且也是生物改良盐渍土的一种有效措施。种植怪柳后会对盐碱地生态环境产生一定影响, 很多学者对此进行了多方面的研究。本文拟从物理、化学等方面就怪柳对盐渍土生态环境要素的影响进行总结评述, 以期今后怪柳林生态环境研究及怪柳在盐碱地的进一步推广与合理利用提供参考。

1 怪柳对盐渍土理化性质的影响

1.1 怪柳对土壤盐分的影响

过量的盐分能引起土壤物理和化学性质的改变, 高盐度会抑制植物生长, 影响其对氮、磷等养分的吸收^[3]。部分植物在长期进化过程中, 对盐分胁迫有了一定的适应, 并逐渐发展为耐盐植物^[4], 怪柳就是其中的一种。怪柳的耐盐能力较强^[5-6], 其耐盐极限可达 25 g/kg^[7]。怪柳对盐渍土盐分的影响, 主要存在两种观点: 一种观点认为怪柳能够降低土壤盐分; 另一种认为怪柳对土壤盐分有积聚作用。

怪柳对土壤的降盐途径主要有 3 种。一是土壤盐分由根部到叶部的转移。怪柳是泌盐植物^[8], 能通过根系吸收和积累土壤中的盐分作为渗透调节物质, 将盐分运输到叶和细枝通过泌盐腺以盐粒结晶的方式将其排出体外, 进而调节体内盐分平衡, 维持渗透压, 实现在高盐度环境下生存生长^[9-10]。因此可以通过对怪柳枝叶的收获, 实现土壤盐分转移^[7, 11]; 二

是种植怪柳后植被盖度增加, 植物的蒸腾作用减轻了盐碱地的地面蒸发, 减少地表返盐^[12]; 三是土壤的淋溶作用。由于怪柳蒸腾作用降低了地下水位, 减少了盐分在地表的积累, 其枯枝落叶等增加了地表粗糙度, 更多的截留降雨, 加强土壤淋溶作用, 将地表和土体间的积盐淋溶下去^[13]。此外, 怪柳对土壤盐分的影响表现出一定的区化特征: 在平面分布上, 离怪柳灌丛越近, 土壤含盐量越低, 并在离怪柳 0~15 cm 范围内形成低盐区; 在垂直分布上, 土壤的含盐量随怪柳根深度的增加而明显降低^[14]。

但是, 也有不少研究认为怪柳对土壤盐分有积聚作用即所谓的“盐岛效应”。其“增盐”机制包括生物积盐作用和非生物环境作用。生物积盐作用主要通过怪柳根系吸收土壤中的盐分, 运输到枝叶, 最后以凋落物的形式回落到表层土壤中, 由于怪柳的泌盐作用使得叶片中含有较高的盐分, 因此落入土壤表层的凋落物便增加了怪柳灌丛下土壤的含盐量, 产生盐岛效应^[15]。也有研究认为“盐岛”的形成主要是由于多年生盐生植物根系的驱动力作用^[16]。非生物环境作用主要由于地下水蒸发聚盐和风沙的侵蚀^[17-18]。当怪柳地上生物积盐量超过背景地下水活动造成的地表聚盐时会导致“盐岛”形成。环境中盐分过重或者过于干旱都会降低盐岛效应, 而在水盐条件适宜怪柳生长的环境中, 盐岛效应最强^[19]。

以上两种观点看似相反, 但实际上并不矛盾。第一种观点所谓的怪柳降盐作用, 指的是怪柳林土壤

收稿日期: 2013-03-17; 修回日期: 2013-05-25

基金项目: 海洋公益专项(201205008)

作者简介: 何秀平(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生物地球化学, 电话: 0532-88962016, E-mail: 217718286@qq.com; 王保栋, 通信作者, E-mail: wangbd@fio.org.cn

盐分总量的变化;第二种观点所谓的“盐岛效应”,指的是怪柳林土壤盐分空间分布的变化。也就是说怪柳林地土壤盐分总量在逐渐减少。然而,对于产生盐分区化特征以及盐岛效应两种不同观点的原因尚待进一步研究。

1.2 怪柳对土壤水分的影响

土壤中的水分含量是影响植物生长的重要环境因子。怪柳自身的多种优点使目前很多盐碱地区将其引种用于防风固沙及土壤改造,因此其对土壤水分含量的影响与相互关系成为目前研究的重要课题。

现阶段关于种植怪柳对土壤水分的影响有两种不同的观点。一种认为怪柳的生长会降低土壤含水量,可能与怪柳过高的耗水量有关^[19-20]。此外,干旱盐碱地土壤中的水分含量会随植被树龄的增加而降低^[21]。

另一种观点认为怪柳种植后可以提高土壤水分含量。在一定的土壤厚度条件下,土壤的贮水特性取决于土壤孔隙的大小,或者说取决于植被对土壤孔隙状况改善作用的大小^[22]。研究发现怪柳根系土壤的贮水能力明显高于空白土壤,且从表层到深层,土壤贮水能力呈降低趋势,认为是由于怪柳根系的穿插作用与其发达的根系形成根间连生现象提高了土壤的贮水能力^[23]。此外,怪柳种植后土壤物理性质发生相应改变,粘粒减少、孔隙状况改善,水分入渗率升高,这也是水分在改良后的土壤中积聚起来的一个原因^[24]。

笔者认为,之所以存在以上两种截然相反的观点,可能是不同研究者所研究区域的气候及水文条件的不同所致。由于干旱和极干旱地区降水很少,此时怪柳的耗水是控制土壤中水量平衡的控制因子,因而土壤含水量会逐渐降低;相反,在降水较丰沛或有横向水输入的区域(如滨海湿地),怪柳根系的贮水能力及土壤物理性质成为控制土壤含水量的关键因子,并因此而提高土壤水分含量。

1.3 怪柳对土壤 pH 值的影响

土壤 pH 值影响土壤溶液中各种离子的浓度和存在形式,从而影响植物对养分的吸收^[25-26]。利用不同 pH 值的土壤对怪柳进行栽植实验,结果表明怪柳具有较高的耐盐碱能力,其对土壤 pH 值的极限值是 $\text{pH} < 11$ ^[27]。

关于怪柳对土壤 pH 影响方面的结论有不少争议。一种观点认为,种植怪柳能够降低土壤 pH 值^[13, 28]。其

机理包括吸收导致土壤碱性的离子以及根际周围产生中和碱性的物质。怪柳生长过程中在摄取土壤中的养料与水分的同时还能吸收大量导致土壤碱性的碱金属及碱土金属的碳酸盐和碳酸氢盐等离子。茎、叶的肉质化使其能吸收和储存大量水分,稀释体内的盐离子避免本身受到其伤害^[23]。怪柳根际周围中和碱性物质的产生则是怪柳根系与土壤微生物共同作用的结果。怪柳的根系会分泌有机酸;根际在吸收养分离子时会释放 $\text{H}^+/\text{HCO}_3^-$ ^[29];根际微生物呼吸作用产生二氧化碳;植物残体经微生物分解会产生有机酸^[30],这些都会中和土壤中的碱性物质,使土壤的 pH 值下降。

另一种观点认为,盐碱地种植怪柳会使土壤 pH 值升高^[31-32]。原因可能与灌木种类和凋落物的酸碱度有关^[31],同时怪柳同化枝盐腺与空气中的 CO_2 结合会形成 HCO_3^- ^[33],落入土壤后,会增加土壤碱性,另外,由于 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 在根际内会有少量富集也会对土壤碱性有一定影响^[34]。

还有观点认为,怪柳对土壤 pH 的影响并不是单纯的升高与降低,还受土壤深度、植物生长期等影响。种植怪柳后 pH 值随土壤深度和离怪柳树干距离的增加而增加^[14]。同时对不同生长期怪柳林研究发现,在怪柳幼林期,土壤 pH 升幅最大,随树木生长期增长,表层 pH 呈降低趋势^[35]。

2 怪柳对盐渍土物质循环的影响

2.1 怪柳对土壤有机质的影响

土壤有机质含量的高低是衡量土壤肥力的重要指标,盐碱地由于其特殊的性质,一般有机质的含量较少,土壤肥力低,因此了解盐碱地种植怪柳对土壤有机质的影响非常重要。对种植怪柳区土壤的研究表明栽植怪柳可使土壤有机质含量增加,有利于提高土壤肥力和其他植物的存活,从而可以改良滨海盐渍土壤^[23]。

将不同类型滨海盐碱地和内陆盐碱地怪柳林区土壤有机质含量进行对比,发现种植怪柳后土壤有机质含量提高了 12%~500%^[7, 14, 30, 35-36],证实种植怪柳确实能够显著提高土壤肥力。对其土壤剖面的调查发现不同深度有机质的增加量表现出一定的分布趋势,即表层大于深层。这主要是由于怪柳生长达一定盖度后,截留于土壤中的枯枝落叶,被微生物分解,造成表层土壤有机质含量增加^[13],同时残留根系的腐烂也会相应的增加深层土壤中的有机质和无

机养分^[37]。有研究表明, 怪柳对土壤有机质的影响表现出一定的区化特征, 种植怪柳后, 土壤有机质随土壤深度和离树干距离的增加呈下降趋势^[14]。另外, 也有人认为怪柳对有机质有富集作用, 在怪柳灌丛下形成“肥岛效应”, 并将原因归结为植物根系的动力学作用, 即怪柳根系将地下水和深层土壤中的养分吸收到地上部, 而后以凋落物的形式返还到地面, 造成有机质在表层土壤的积累^[34, 36, 38]。

2.2 怪柳对土壤营养盐循环的影响

2.2.1 怪柳对土壤 N 循环的影响

氮是植物从土壤中吸收最大的矿质元素^[39], 其生物地球化学循环过程是氮素在土壤-植物-大气之间进行的各种迁移转化和能量转换过程^[40]。

怪柳对土壤中 N 循环的影响主要是通过微生物作用实现的。其主要的生物地球化学过程如图 1 所示。怪柳的枯枝落叶等含氮有机物进入土壤后在土壤中微生物的作用下发生氨化作用转化成简单含 N 化合物, 经过脱氨基作用生成 NH_4^+ , 在硝化细菌的作用下逐步将 NH_4^+ 转化为可溶性的无机态 NO_2^- 和 NO_3^- , 怪柳通过吸收这些无机态的氮将其同化为有机氮, 形成一种良性循环^[41]。但是, 在厌氧条件下反硝化细菌会还原硝酸盐, 释放出分子态氮(N_2 或 N_2O); 另外, 由于盐碱地土壤偏碱性, NH_4^+ 易转化成 NH_3 , 加上对怪柳的收割等因素都会导致盐碱地氮的流失^[42]。

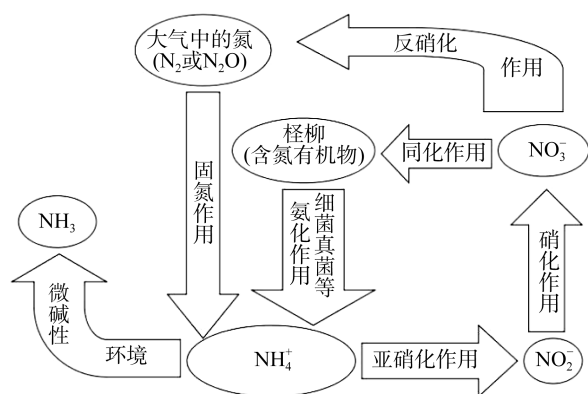


图 1 怪柳对盐碱地氮循环的影响过程^[39]

大量研究表明, 怪柳能够提高盐碱地 N 含量^[7, 28, 30], 主要原因是由于植物蒸腾作用引起水分及养分向根表转移; 植物自身对养分的需求也会使养分向根际转移速率的增加, 当其大于植物自身对养分的吸收速率时, 会导致这种养分在根际发生积累^[26]; 微生

物和植物根系的相互作用也可以加速有机态氮向植物可利用态氮转化的速率^[43]。

2.2.2 怪柳对土壤 P 循环的影响

磷是生态系统中一种重要的限制性养分和矿物元素^[44], 磷在盐碱地中以可溶态和不可溶态的形式存在, 能被植物利用的部分称为“活性磷酸盐”又称有效磷^[45]。

磷在盐碱地的循环过程可以概括为: 怪柳吸收土壤中的无机磷及吸附在黏土表面而沉积的磷, 同时其又可以将吸收的无机磷合成复杂的有机磷储存在土壤中, 经过土壤微生物的作用把有机磷进一步降解为可溶性有效磷^[46]。由于怪柳所摄取的土壤中的磷大多数是正磷酸盐离子, 盐碱地土壤的碱性环境使磷多形成水合金属磷酸盐共沉淀于土壤中^[45], 这种沉淀是不能被植物直接吸收的。而怪柳根际微生物代谢会产生酸性物质, 使根际 pH 值降低, 促进水合金属磷酸盐的溶解^[29, 47-48], 增加了植物根际土壤中可溶性磷酸盐的含量^[49]。

2.2.3 怪柳对土壤 Si 循环的影响

怪柳在硅的生物地球化学循环中起着重要作用。首先, 硅是怪柳生长所需要的一种重要元素, 能够促进怪柳生长^[50], 增加其细胞壁的延展性^[51], 增强怪柳对盐胁迫的抵抗力^[52]; 其次, 怪柳在生长过程中不断的以溶解态 H_4SiO_4 的形式吸收硅, 以生物硅的形式贮存, 生长季节结束后, 怪柳残体逐渐被微生物分解, 其体内的生物硅逐渐被释放到土壤中, 其中大部分被植物再吸收, 少量保留在土壤中^[53-54]。怪柳对硅的这种作用为土壤溶液提供大量可溶解的硅^[55]。通过植物-土壤之间的循环, 减少了硅向河流、海洋的输入, 使其大量贮存在土壤中, 成为硅循环的一个重要组成部分^[56]。

2.3 怪柳对盐碱地固碳能力的影响

土壤有机碳库的库容巨大, 其微小的变化就将影响大气 CO_2 浓度, 在全球碳循环中起着重要作用^[57], 研究怪柳对土壤固碳能力的影响对盐渍土在全球碳循环中的作用有重要的理论意义。

怪柳对盐碱地固碳能力的影响主要通过两方面进行: (1) 怪柳自身的同化作用; (2) 有机碳的沉积埋藏作用。怪柳本身可以直接吸收大气中的 CO_2 , 在光能的作用下转变为糖、氧气和有机物为其生长提供基本的物质和能量保障^[58]。这一过程受到光照强度、温度和大气中 CO_2 浓度等的影响。在只考虑光照

因素下,可将光合速率的大小作为固碳能力的主要指标,对新疆地区柽柳固碳能力的研究显示其最大光合速率为 $21.6 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,固碳能力较强^[59],因此增加柽柳的种植面积可以增加盐碱地的固碳能力。柽柳是落叶植物,凋落物沉积可将生物碳转化为土壤碳,成为盐碱地固碳的又一途径。柽柳冠下凋落物的沉积作用是土壤有机碳的重要来源^[60],同时,生长在干旱盐碱地的柽柳,为了充分吸收水分,常有庞大的植物根系,为地下有机碳库提供了重要来源。部分灌木柽柳其内部构造使其冠下土壤具有最典型意义的碳蓄积和碳埋藏作用,可使有机碳得以长期保存^[61-63]。盐碱地对地球表层系统中碳的收支起到重要作用。一方面吸收大气的温室气体,能减缓全球气候变暖。另一方面土壤有机质经微生物矿化分解产生 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体,能促进全球变暖^[58]。两者的平衡关系,决定其是温室气体的源或汇。

3 结论与展望

柽柳属于泌盐盐生植物,具有很强的耐盐碱能力,是盐碱地种植的首选灌木。柽柳的种植可以在一定程度上改变盐碱地的土壤性状,增加土壤的植被盖度,使盐分发生转移,增加土壤有机质的含量,改善土壤肥力,对盐碱地起到改良作用,并显著提高盐碱地的生态与环境功能。

目前关于柽柳种植对盐碱地生态环境影响方面已经开展了一些研究,也取得了很多可喜的成果,但是随着研究的深入也产生了一些亟需解决的问题:(1)柽柳的种植对盐碱地盐分分布的影响究竟是产生盐岛效应还是区化特征?产生这种分布规律的影响因素是什么?以上问题尚需更深入的探究。(2)盐碱地种植柽柳后土壤pH值是升高还是降低,还存在很大的争议,造成土壤pH值不同变化的原因尚需进一步研究。(3)柽柳的固碳能力评估及其影响因素以及与氮的耦合关系如何?(4)柽柳种植对盐碱地排放温室气体(如甲烷,氧化亚氮等)的影响。

参考文献:

- [1] 赵可夫. 盐生植物资源及盐碱土改良利用研究动态[J]. 资源与环境, 1989, 1(1): 40-43.
- [2] 赵可夫. 中国盐生植物[M]. 北京: 北京科技出版社, 1999.
- [3] Brown C E, Pezeshki S R, DeLaune R D. The effects of salinity and soil drying on nutrient uptake and growth

of *Spartina alterniflora* in a simulated tidal system[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 58: 140-148.

- [4] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11: 501-521.
- [5] 谢小丁, 邵秋玲, 李扬. 九种耐盐植物在滨海盐碱地的耐盐能力试验[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(4): 559-561.
- [6] 侯军铭, 梁海永, 王颖, 等. 不同盐碱区白榆、白蜡、紫穗槐、柽柳体内离子分布特征[J]. 中国农学通报, 2009, 25(9): 277-281.
- [7] 张立宾, 宋日荣, 吴霞. 柽柳的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(13): 5424-5426.
- [8] 秦嘉海, 吕彪, 赵芸晨. 河西走廊盐土资源及耐盐牧草改土培肥效应的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 71-75.
- [9] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳泌盐腺结构、功能及分泌机制研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 190-194.
- [10] 王伟华, 张希明, 闫海龙, 等. 盐处理对多枝柽柳光合作用和渗透物质的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 561-568.
- [11] 张文军, 玉井重信, 矢部麟彦, 等. 利用柽柳改良盐碱地土壤的机制与措施初报[J]. 内蒙古林业科技, 2004, 4: 3-7.
- [12] 周三, 韩军丽, 赵可夫. 泌盐盐生植物研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(5): 496-501.
- [13] 王玉龙, 李志格, 张峰, 等. 柽柳林下土壤剖面调查[J]. 内蒙古林业调查设计, 2004, 27: 71-72.
- [14] 雷金银, 班乃荣, 张永宏, 等. 柽柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 73-76.
- [15] Burke I C, Reiners W A, Sturges D L, et al. Herbicide treatment effects on properties of mountain big sagebrush soils after fourteen years[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1337-1343.
- [16] Waisel Y. The Biology of Halophytes[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [17] 樊自立, 马英杰, 张宏, 等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区研究, 2004, 27(1): 8-13.
- [18] Okin G S, Murray B, Schlesinger W H. Degradation of

- sandy arid shrubland environments: observations, process modeling, and management implications[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(2): 123-144.
- [19] 尹传华, 冯固, 田长彦, 等. 塔克拉玛干沙漠边缘柽柳对土壤水盐分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(5): 670-675.
- [20] Di Tomaso J. Impact, biology, and ecology of saltcedar(*Tamarix* spp.) in the southwestern United States[J]. *Weed Technology*, 1998, 12(2): 326-336.
- [21] 阿拉木萨, 蒋德明, 骆永明. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 107-110.
- [22] 丁海荣, 洪立洲, 杨智青. 盐生植物碱蓬及其研究进展[J]. *江西农业学报*, 2008, 20(8): 35-37.
- [23] 关洪斌, 王晓兰, 鞠迪. 柽柳对滨海盐渍土的改良作用及其应用[J]. *资源开发与市场*, 2009, 25(10): 918-921.
- [24] 王苗, 齐树亭, 葛美丽. 盐生植物对滨海盐渍土生物改良的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(7): 2898-2899.
- [25] Philippe H, Claude P, Benoit J. Rhizosphere: A new frontier for soil biogeochemistry[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88: 210-213.
- [26] Hinsinger P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere[J]. *Advances in Agronomy*, 1998, 64: 225-265.
- [27] 李晓茹, 藏敬艳, 宗成聚, 等. 柽柳造林新技术[J]. *林业科技*, 1996, 1(21): 15-16.
- [28] 王震宇, 赵芳芳, 张保国, 等. 黄河三角洲盐生植物氮和磷的根际效应[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(10): 33-38.
- [29] Hinsinger P, Plassard C, Tang C, et al. Origins of root-induced pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248: 43-59.
- [30] 王玉珍, 刘永信, 魏春兰, 等. 6种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(5): 951-952, 957.
- [31] Titus J H, Nowak R S, Smith S D. Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52(3): 269-292.
- [32] 王立艳, 潘杰, 肖辉, 等. 不同耐盐植物对滨海盐土可溶性盐分运移的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(20): 250-254.
- [33] Waisel Y. The glands of *Tamarix aphylla*: a system for salt recretion or for carbon concentration[J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, 83(3): 506-510.
- [34] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3565-3571.
- [35] 于雷, 潘文利, 郑景明, 等. 柽柳防护林对海堤重盐土改良作用的研究[J]. *辽宁林业科技*, 1998, 3: 34-37.
- [36] 尹传华, 冯固, 田长彦, 等. 干旱区柽柳灌丛下土壤有机质、盐分的富集效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 263-265.
- [37] 李必华, 邢尚军, 商华妃, 等. 滨海拓荒植物[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.
- [38] Burke I C, Lauenrth W, Vinton M A. Plant-soil interactions in temperate grasslands[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 121-143.
- [39] 周念清, 王燕, 钱家忠, 等. 湿地氮循环及其对环境变化影响研究进展[J]. *同济大学学报*, 2010, 38(6): 865-869.
- [40] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes[J]. *Ecological Modeling*, 1997, 105: 1-21.
- [41] Jorgensen L A. The cycling of nitrogen in the danish agricultural sector and the loss to environment[J]. *Water Science Technology*, 1999, 39(3): 15-23.
- [42] 马欣欣, 王忠良. 湿地氮循环过程及其研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(17): 9454-9458, 9488.
- [43] Herman D J, Johnson K K, Jaeger C H, et al. Root influence on nitrogen mineralization and nitrification in *Avena barbata* rhizosphere soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1504-1511.
- [44] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [45] 吴莹, 张经, 李道季. 营养盐氮、磷在湿地中的迁移与循环[J]. *海洋科学*, 2004, 28(3): 69-72.
- [46] 孙宏发, 刘占波, 谢安. 湿地磷的生物地球化学循环及影响因素[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(1): 148-152.
- [47] Van Breemen N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic

- deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters[J]. *Nature*, 1984, 307: 599-604.
- [48] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237: 173-195.
- [49] Murrnann R P, Peech M. Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1969, 33: 205-210.
- [50] Hammerschmidt R. Silicon and plant defense: The evidence continues to mount[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2005, 66: 117-118.
- [51] Hossain M T, Mori R, Soga K, et al. Growth promotion and increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings[J]. *Journal of Plant Research*, 2002, 115: 23-27.
- [52] 梁永超, 丁瑞兴, 刘谦. 硅对大麦耐盐性的影响及其机制[J]. *中国农业科学*, 1999, 32(6): 75-83.
- [53] Alexandre A, Meunier J D, Colin F, et al. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes[J]. *Geochemical et Cosmochemical Acta*, 1997, 61: 677-682.
- [54] Moulton K L, West J, Berner R A. Solute flux and mineral mass balance approaches to the quantification of plant effects on silicate weathering[J]. *American Journal of Science*, 2000, 300: 539-570.
- [55] 王立军, 季红兵, 丁淮剑, 等. 硅的生物地球化学循环研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(2): 188-194.
- [56] 汪秀芳, 陈圣宾, 宋爱琴, 等. 植物在硅生物地球化学循环过程中的作用[J]. *生态学杂志*, 2007, 2(64): 595-600.
- [57] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. *Nature*, 2000, 408: 789-790.
- [58] 张兵, 王洋. 芦苇湿地的碳汇功能研究[J]. *现代农业科技*, 2011, 16: 287-288.
- [59] 郑朝辉, 马春霞, 马江林, 等. 四种灌木树种固碳能力和能量转化效率分析[J]. *湖北农业科学*, 2009, 50(22): 4633-4635, 4643.
- [60] 贺俊霞, 穆桂金, 张鹏, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘柽柳冠下枯枝落叶沉积特征[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(4): 781-788.
- [61] 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J]. *干旱区研究*, 1994, 11(1): 34-41.
- [62] 吴海斌, 郭正堂, 彭长辉. 末次间冰期以来陆地生态系统的碳储量与气候变化[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 366-376.
- [63] 秦小光, 李长生, 蔡炳贵. 气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(2): 153-161.

(本文编辑: 康亦兼)