

盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征*

张立华 陈小兵**

(中国科学院烟台海岸带研究所/中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003)

摘要 为了探讨“盐岛”和“肥岛”效应影响下盐碱地的养分特征,对黄河三角洲盐碱地柽柳植株周围不同土层的 pH 值、电导率和碳氮磷含量及其生态化学计量学特征进行了研究.结果表明:土壤 pH 和电导率均随土层的加深而升高,0~20 cm 土层土壤电导率随离植株距离的增加而降低,全磷含量则升高.20~40 cm 土层土壤有机碳、全氮、N/P 和 C/P 随离柽柳植株距离的增加而降低,C/N 则升高.随着土层的加深,有机碳和全氮均呈降低趋势,而全磷则先降低后升高.土壤 pH 与电导率呈显著正相关,且二者与土壤碳氮磷及其生态化学计量比之间均呈显著负相关.

关键词 柽柳; 肥岛; 碳; 氮; 磷; 盐碱地

文章编号 1001-9332(2015)03-0653-06 中图分类号 Q14 文献标识码 A

Characteristics of ‘salt island’ and ‘fertile island’ for *Tamarix chinensis* and soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in saline-alkali land. ZHANG Li-hua, CHEN Xiao-bing (Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(3): 653-658.

Abstract: To clarify the nutrient characteristics of ‘salt island’ and ‘fertile island’ effects in saline-alkali soil, the native *Tamarix chinensis* of the Yellow River Delta (YRD) was selected to measure its soil pH, electrical conductivity (EC), organic carbon (SOC), total nitrogen (N), total phosphorus (P) and their stoichiometry characteristics at different soil depths. The results showed that soil pH and EC increased with the increasing soil depth. Soil EC and P in the 0-20 cm layer decreased and increased from canopied area to interspace, respectively. SOC, N, N/P and C/P in the 20-40 cm soil layer decreased, and C/N increased from the shrub center to interspace. SOC and N contents between island and interspace both decreased but P content decreased firstly and then increased with the increasing soil depth. Soil pH correlated positively with EC. In addition, pH and EC correlated negatively with C, N, P contents and their ecological stoichiometry.

Key words: *Tamarix chinensis*; fertile island; carbon; nitrogen; phosphorus; saline-alkali land.
DOI:10.13287/j.1001-9332.20150106.008

在生物和非生物过程中土壤资源聚集于植物周围,导致土壤养分含量由植株向外逐步降低,从而形成“肥岛”^[1]。“肥岛”是土壤小尺度空间异质性的表现,但对生态系统大尺度植被格局具有重要影响^[2]。正是由于植物的“肥岛”效应促进了自身的扩张,抑制了其他植物的生长,导致生态系统生物多样性降低,这可能加速了北美干旱草原的荒漠化进程^[3]。另

一方面,“肥岛”效应的存在是植物有效利用养分和适应贫瘠环境的主要对策和重要机制^[4-5]。在过去几十年里,土壤“肥岛”效应已成为土壤学和生态学研究的热点^[4,6],但主要集中在北美^[7]。近年来此现象越来越引起我国科学家的关注^[1,4,8-11]。

最早于20世纪50年代针对水生生态系统开展的生态化学计量学研究经过系统化和逐步成熟后,在20世纪90年代开始广泛应用到陆地生态系统,成为生态学、生物化学和土壤化学研究的新方向,为探究生物系统能量和元素平衡提供了新思路^[12-13]。作为生物体的重要组成元素,碳是其重要

* 国家自然科学基金项目(41201293)和海洋公益性行业科研专项(201105020)资助。
** 通讯作者, E-mail: xbchen@yic.ac.cn
2014-07-10 收稿, 2014-12-22 接受。

的结构物质,而氮和磷通常成为生物生长的限制性因子^[14-15].与国外相比,我国对碳氮磷生态化学计量学的研究起步较晚,且主要以植物为研究对象^[16-17].因为植物中的碳氮磷生态化学计量学特征对预测有机质分解和养分限制性具有良好的指示作用^[18].而对土壤开展该特征的研究,对于揭示土壤中养分的有效性以及碳氮磷养分的循环和平衡机制具有重要意义^[19].

柽柳(*Tamarix chinensis*)属柽柳科植物,多为灌木,是典型的泌盐植物,具有很高的耐盐能力,喜光,耐潮湿,耐瘠薄,能防风固沙、保持水土、调节气候,维护陆海生态平衡,且能显著改良土壤理化性质.作为关键的木本植物建群物种,柽柳在黄河三角洲滨海沿岸盐碱地及内陆低洼盐渍区构成大面积天然林带,形成了黄河三角洲最大的灌木群落和山东最大的天然灌丛^[20].李君等^[1]揭示了准噶尔盆地南缘柽柳“肥岛”效应的存在,其“肥岛”现象主要表现在土壤表层,与“岛”外土壤的差异随土壤深度增加而减弱.柽柳较高的耐盐能力和“肥岛”效应对贫瘠生境的改良可能是其成为黄河三角洲盐碱地建群种的重要原因.为此,本文对黄河三角洲盐碱地柽柳“肥岛”效应及生态化学计量学特征进行研究,旨在揭示柽柳对贫瘠盐碱地生境的适应和改良机制,为黄河三角洲盐碱地的植被恢复提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海湾畔,土地总面积约12000 km²,是我国三大河口三角洲之一,也是世界上增长速度最快和尚未得到大规模开发的最大三角洲之一^[21].黄河三角洲作为我国最年轻的河口湿地,有中国暖温带最广阔、最完整的河口新生湿地生态系统,具有原始的生态系统特征,是河口生态演替研究的重要地点.该区自然资源丰富,但由于形成时间较晚,是海陆交互作用形成的退海之地,土壤肥力低,加之气候干旱,地下水矿化度高,极易引起土壤盐渍化.该区域属于温带半湿润大陆性季风气候,年均气温11.7~12.8℃,年蒸发量和降水量分别为1900~2400和530~630 mm,70%的降水集中在夏季^[22].土壤以滨海潮土和滨海盐土为主.该区域分布的主要植物有:柽柳、芦苇(*Phragmites australis*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)、獐茅(*Aeluropus litoralis* var. *sinensis*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)和香蒲(*Typha angustifolia*)等^[23].研究样地设在中国科学院黄河三角洲滨

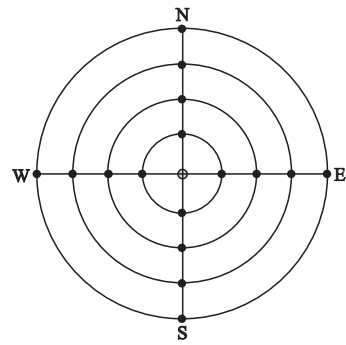


图1 柽柳个体周围土壤采样点

Fig. 1 Sampling points around the individual of *Tamarix chinensis*.

海湿地生态试验站(37°45'50" N, 118°59'24" E),样地内以柽柳和芦苇为主.

1.2 样品采集

为确定盐碱地柽柳个体周围土壤养分和盐分的空间分布,2013年8月在样地内随机选取长势基本一致的独立小乔木型柽柳5株,基径、株高和冠幅分别为8 cm、2 m和3 m×3 m左右.在柽柳主干周围半径3 m内,按东、南、西、北4个方向用土钻在分别距主干0.5、1.0、1.5和2.0 m 4个点位取样(图1),每个点位取0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm 5个土层,每株采集土壤样品80个.土样装入自封袋带回实验室,经自然风干后去除植物残体和石块,取部分风干土样过100目孔筛,装袋备用.

1.3 测定项目及方法

土壤pH值和电导率(EC)分别利用电位法和电导法按土水比1:5测定;有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用大进样量元素分析仪(VARIO Macro,德国Elementer公司)测定;全磷采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定.

1.4 数据处理

利用Excel 2013软件计算平均值和标准偏差,数据统计分析采用SPSS 15.0软件,相关分析采用线性相关性分析;在单因素方差分析(one-way ANOVA)的基础上,利用多重比较的方法(S-N-K)对离柽柳主干不同距离和不同土层的土壤pH值、电导率、碳氮磷含量和碳氮磷含量比进行显著性检验($\alpha=0.05$).

2 结果与分析

2.1 土壤pH值和电导率的变化

由图2可以看出,柽柳个体周围不同土层土壤pH和电导率分别为7.81~8.28和1.20~2.40

表 1 距离和土层对土壤 pH、电导率、养分含量和生态化学计量比影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance for effects of distance and soil depth on pH, EC, nutrient content and the ecological stoichiometric ratios

	pH	电导率 EC	有机碳 SOC	全氮 Total N	全磷 Total P	C/N	C/P	N/P
距离 Distance	0.887	0.001	0.199	0.000	0.965	0.001	0.189	0.000
土层 Soil depth	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
距离×土层 Distance×soil depth	0.995	0.422	0.019	0.074	0.126	0.016	0.057	0.112

表中数据为 P 值 Data in the table were P value.

mS · cm⁻¹.二者均随着土层的加深而升高;除了表层土壤电导率随着离植株距离的增加而降低外,pH 值和其他土层的电导率随着距离的改变没有一致的变化规律.方差分析表明,土层对 pH 值和电导率均具有显著影响,距离仅对电导率有显著影响,而距离与土层的交互效应对二者的影响均不显著(表 1).

2.2 土壤碳氮磷含量及其生态化学计量比

由图 3 可以看出,土壤有机碳、全氮和全磷在土壤中的含量分别为 0.68~7.34、0.31~0.97 和 0.54~0.63 g · kg⁻¹,与有机碳和全氮相比,全磷的波动范围较小.有机碳和全氮含量在 20~40 cm 土层中随着离柽柳植株距离的增加而降低,表现出显著的“肥岛”效应,而全磷在 0~20 cm 土层中随着离柽柳植株距离的增加而升高.此外,三者柽柳植株周围其他土层中没有明显的变化趋势.随着土层的加深,有机碳和全氮均呈降低趋势,而全磷先降低后升高,在 40~60 cm 土层中含量最低.由表 1 可以看出,土层对三者的影响显著,而距离及其与土层的交互效应

仅分别对全氮和有机碳的影响显著.

土壤 C/N(2.28~8.97)在 20~40 cm 土层中随着离树体距离的增加而升高,C/P(1.46~12.19)和 N/P(0.54~1.63)在该土层中呈逐渐降低趋势,而在其他土层中没有明显的变化趋势.但在离植株不同距离的 4 个点上,三者均随着土层深度的增加而降低.经多因素方差分析,土层对三者的影响均达到显著水平,距离对 C/N 和 N/P 的影响显著,而距离与土层的交互效应仅对 C/N 产生显著影响(表 1).

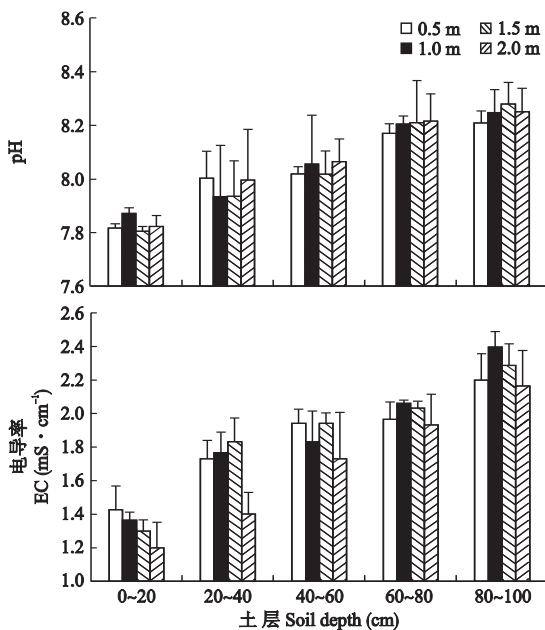


图 2 柽柳个体周围不同土层土壤 pH 和电导率的变化
Fig.2 Changes in soil pH and EC at different depths around the individual of *Tamarix chinensis*.

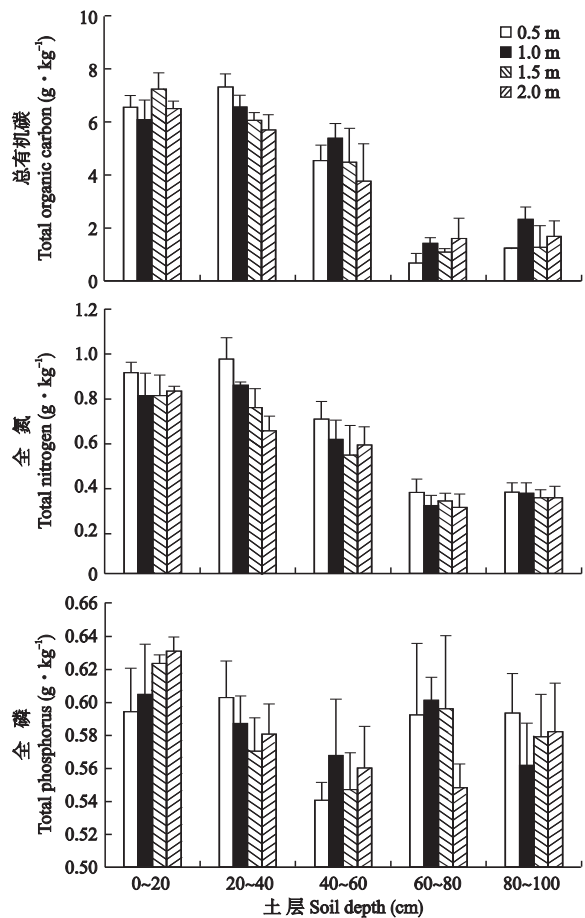


图 3 柽柳个体周围不同土层有机碳、全氮、全磷含量及碳氮比、碳磷比和氮磷比的变化

Fig.3 Changes in soil organic carbon, total carbon, total phosphorus contents and C/N, C/P and N/P at different depths around the individual of *Tamarix chinensis*.

表 2 土壤 pH、电导率、养分含量与生态化学计量比之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among soil pH, EC, nutrient content and the ecological stoichiometric ratio

	EC	C	N	P	C/N	C/P	N/P
pH	0.682**	-0.778**	-0.756**	-0.145	-0.670**	-0.773**	-0.753**
EC		-0.722**	-0.720**	-0.359**	-0.556**	-0.690**	-0.681**
C			0.941**	0.199	0.877**	0.994**	0.936**
N				0.264*	0.682**	0.929**	0.989**
P					-0.038	0.106	0.129
C/N						0.892**	0.701**
C/P							0.939**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

2.3 土壤 pH、电导率及碳氮磷生态化学计量比的相关性

土壤 pH 与电导率之间呈显著的正相关关系(表 2) 除 pH 值与土壤全磷之间的相关性不显著外, pH 值和电导率与土壤碳氮磷及其生态化学计量比之间均呈显著负相关. 有机碳与全氮之间和全氮与全磷之间的相关性均达到显著水平, 而有机碳与全磷之间的相关性不显著. 除全磷与 C/N、C/P 和 N/P 之间没有显著相关性外, 有机碳和全氮与三者均呈显著相关. 而碳氮磷生态化学计量比之间也呈显著正相关.

3 讨 论

由于生物积盐的作用, 盐生灌木可以在其植丛下形成“盐岛”^[24-25]. 尹传华等^[26]对塔里木盆地北缘盐化草甸生境和灌丛生境盐生灌木的研究表明, 多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)和盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)均有不同程度的“盐岛”效应, 且三者产生的盐岛效应增强了土壤表层的积盐速率. 此外, 多枝柽柳、盐穗木和盐节木均能显著增加表层土壤 pH, 增强土壤的碱性. 有研究显示, 树冠下土壤 pH 和电导率高于树冠边缘及外围空地^[27]; 但也有相反的结论, 即土壤在树干中心形成了低 pH 值和低盐的环境^[10]. Dong 等^[28]认为, 电导率和 pH 值存在不同的变化趋势, 即树冠下土壤电导率高于而 pH 值低于树冠外围土壤. 另外, 也有树冠下土壤 pH 和电导率与树冠外围土壤无差异的报道^[6]. 本研究中, 柽柳树冠下土壤 pH 与树冠边缘没有显著差异, 但表层土壤(0~20 cm)电导率随着离树干中心距离的增加而降低. 与尹传华等^[26]的研究结果不同, 本研究中 pH 值和电导率在表层土壤中最低, 且随着土层的增加而升高. 这可能是由于本次采样是在雨季之后的 8 月下旬进行的, 土壤表层的盐碱经过雨水的淋洗向土壤深层

渗漏. 因此, 为了更全面地了解“盐岛”效应的存在规律, 有必要开展不同季节土壤“盐岛”效应的变化趋势研究.

本研究中, 土壤养分含量随着土壤深度的增加而降低, 尤其是有机碳和全氮, 而全磷降低较少. 这与文献[29-30]的研究结果一致. 这是由于表层土壤易受外界环境因素的影响, 加之凋落物分解后的养分归还导致养分在土壤表层聚集, 然后随着水分或其他介质向土壤深层迁移扩散. 由于土壤碳氮除了受土壤母质的影响外, 还受到枯落物分解及植物吸收利用的影响, 因而存在较大的空间异质性, 而磷主要受土壤风化的影响. 由于土壤风化是一个漫长的过程, 且风化程度在一定的土壤层中差异不大, 因而变异性较小^[31]. 这可能也是造成土壤有机碳和全氮表现出一定程度的“肥岛”效应, 而全磷没有的原因. 在 0~60 cm 土层中, 尤其是 20~40 cm 土层, 有机碳和全氮含量随着离植株距离的增加而降低, 表现出明显的“肥岛”效应. 这是由于植物侧根将植株周围土壤中的养分吸收之后, 一部分供植物生长发育的需要, 一部分通过凋落物的形式聚集到冠层下形成养分库^[32]. 因此, “肥岛”效应的大小不仅与冠层大小有关, 也与地下部分根系的分布范围有关. 综上, 土壤磷含量主要受土壤风化的影响, 而土壤风化速率随着温度的升高而加快. 由于冠层的遮阴作用, 冠层下土壤温度低于冠层外, 导致冠层外的风化速率高于冠层下, 使得表层土壤全磷含量随着离植株距离的增加而升高.

土壤 C/N/P 是有机质或其他成分中碳与氮和磷总质量的比值, 是表征土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[14]. 土壤 C/N/P 主要受区域水热条件和成土作用特征的控制. 由于气候、地貌、植被、母岩、年代、土壤动物等土壤形成因子和人类活动的影响, 土壤 C、N、P 总量变化很大, 使得土壤 C/N/P 的空间变异性较大^[14]. C/N 能够影响土壤中有

机碳和氮的循环,是土壤质量的敏感指标^[33].我国土壤的 C/N 平均值为 10~12^[34].本研究中,表层土壤中 C/N 最高,但也不超过 10,土壤有机层的 C/N 较低,表明有机质具有较快的矿化速率.一般 C/N 随着土壤深度的增加而降低^[14],本研究也得出相似的结果.在 20~40 cm 土层中,随着离植株距离的增加全氮比有机碳降低的幅度大,使得 C/N 随着离植株距离的增加而降低.与土壤有机碳和全氮相比,土壤 C/N 在 0~60 cm 土层中相对稳定.这与其他生态系统土壤 C/N 相对稳定的结果一致^[35],也符合化学计量学的基本原则^[36].但由于深层有机碳的含量骤减,60 cm 以下土层中 C/N 显著降低.由于全磷含量相对稳定,而有机碳和全氮表现出“肥岛”效应,所以 C/P 和 N/P 均随着离植株距离的增加而降低.在垂直方向上,二者也均随着土层的加深而降低.在本研究中,土壤全磷含量的平均值为 $0.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与我国土壤全磷含量的平均值 ($0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相近^[37],而 N/P (1.02) 低于其他研究结果^[32, 38-39].这从另一方面验证了黄河三角洲地区盐碱土的氮缺乏,因而在盐碱土的植被恢复过程中,除了降盐之外,还要注重氮肥的适当添加.为了揭示黄河三角洲地区盐碱土养分生态化学计量学特征,有必要深入开展不同植被类型土壤养分生态化学计量学及其与水分、温度和盐度等因素关系的研究,为该地区恢复植被、提高生物多样性和改善生态环境提供科学依据.

参考文献

- [1] Li J (李君), Zhao C-Y (赵成义), Zhu H (朱宏), et al. Species effect of *Tamarix* spp. and *Haloxylon ammodendron* on shrub ‘fertile island’. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5138-5147 (in Chinese)
- [2] Hillerislambers R, Rietkerk M, van den Bosch F, et al. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. *Ecology*, 2001, **82**: 50-61
- [3] Schlesinger WH, Reynolds JF, Cunningham GL, et al. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, **247**: 1043-1048
- [4] Ren X (任雪), Chu G-X (褚贵新), Song R-Q (宋日权), et al. The characteristics of ‘fertile island’ on *Haloxylon ammodendron* at an oasis-desert ecotone in the south edge of Junggar Basin. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2010, **41**(1): 100-104 (in Chinese)
- [5] Martinez-Meza E, Whitford WG. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments*, 1996, **32**: 271-287
- [6] Li J, Zhao C, Zhu H, et al. Effect of plant species on shrub fertile island at an oasis-desert ecotone in the South Junggar Basin, China. *Journal of Arid Environments*, 2007, **71**: 350-361
- [7] Hook PB, Burke IC, Lauenroth WK. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. *Plant and Soil*, 1991, **138**: 247-256
- [8] Su Y-Z (苏永中), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会). Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(7): 802-806 (in Chinese)
- [9] Chu Y (初玉), Yang H-L (杨慧玲), Zhu X-W (朱选伟), et al. Spatial heterogeneity of *Caragana microphylla* shrub communities in the Otindag Sandland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(12): 3294-3300 (in Chinese)
- [10] Li C-J (李从娟), Lei J-Q (雷加强), Xu X-W (徐新文), et al. The effects of stemflow on the formation of ‘fertile island’ and ‘salt island’ for *Haloxylon ammodendron* Bge. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(15): 4819-4826 (in Chinese)
- [11] Xu WX, Liu W, Yang WK, et al. Rhombomys opimus contribution to the ‘fertile island’ effect of tamarisk mounds in Junggar Basin. *Ecological Research*, 2012, **27**: 775-781
- [12] Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, **3**: 540-550
- [13] Hong J-T (洪江涛), Wu J-B (吴建波), Wang X-D (王小丹). Effects of global climate change on the C, N, P stoichiometry of terrestrial plants. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **24**(9): 2658-2665 (in Chinese)
- [14] Wang S-Q (王绍强), Yu G-R (于贵瑞). Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(8): 3937-3943 (in Chinese)
- [15] Guo Z-W (郭子武), Chen S-L (陈双林), Yang Q-P (杨清平), et al. Effects of stand density on *Oligostachyum lubricum* leaf carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometry and nutrient resorption. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(4): 893-899 (in Chinese)
- [16] Gu D-X (顾大彤), Chen S-L (陈双林), Huang Y-Q (黄玉清). Effects of soil nitrogen and phosphonium on leaf nitrogen and phosphonium stoichiometric characteristics and chlorophyll content of *Oligostachyum lubricum*. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(12): 1219-1225 (in Chinese)
- [17] Yan K (阎凯), Fu D-G (付登高), He F (何峰), et al. Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed, southwestern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(4): 353-361 (in Chinese)

- [18] Agren GI. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, **39**: 153–170
- [19] Liu X-H (刘兴华), Chen W-F (陈为峰), Duan C-G (段存国), *et al.* Effect of exploitation of unutilized land on ecological stoichiometry characteristics of plants and soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Yellow River Delta. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2013, **27**(2): 204–208 (in Chinese)
- [20] Tian J-Y (田家怡), Jia W-Z (贾文泽), Dou H-Y (窦洪云). Study on the Biodiversity in the Yellow River Delta. Qingdao: Qingdao Press, 1999 (in Chinese)
- [21] Guo WH, Wang RQ, Zhou SL, *et al.* Genetic diversity and clonal structure of *Phragmites australis* in the Yellow River delta of China. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2003, **31**: 1093–1109
- [22] Song C-Y (宋创业), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), *et al.* Distribution patterns of plant communities in the Yellow River Delta and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2008, **27**(12): 2042–2048 (in Chinese)
- [23] Cui B-S (崔保山), Liu X-T (刘兴土). Ecological character changes and sustainability management of wetlands in the Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 2001, **21**(3): 250–256 (in Chinese)
- [24] Xi J-B (郗金标), Zhang F-S (张福锁), Chen Y (陈阳), *et al.* A preliminary study on salt contents of soil in root canopy area of halophytes. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2004, **15**(1): 53–58 (in Chinese)
- [25] Yin C-H (尹传华), Feng G (冯固), Tian C-Y (田长彦), *et al.* Influence of tamarisk shrub on the distribution of soil salinity and moisture on the edge of Taklamakan Desert. *China Environmental Science (中国环境科学)*, 2007, **27**(5): 670–675 (in Chinese)
- [26] Yin C-H (尹传华), Dong J-Z (董积忠), Shi Q-M (石秋梅), *et al.* Salt island effect of halophytic shrubs in different habitats and its ecological implication. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2012, **49**(2): 289–295 (in Chinese)
- [27] Stock WD, Dlamini TS, Cowling RM. Plant induced fertile islands as possible indicators of desertification in a succulent desert ecosystem in northern Namaqualand, South Africa. *Plant Ecology*, 1999, **142**: 161–167
- [28] Dong XW, Zhang XK, Bao XL, *et al.* Spatial distribution of soil nutrients after the establishment of sand-fixing shrubs on sand dune. *Plant, Soil and Environment*, 2009, **55**: 288–294
- [29] Wei X-R (魏孝荣), Shao M-A (邵明安). The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2007, **27**(2): 603–612 (in Chinese)
- [30] Zhu Q-L (朱秋莲), Xing X-Y (邢肖毅), Zhang H (张宏), *et al.* Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2013, **33**(15): 4674–4682 (in Chinese)
- [31] Liu X-Z (刘兴诏), Zhou G-Y (周国逸), Zhang D-Q (张德强), *et al.* N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2010, **34**(1): 64–71 (in Chinese)
- [32] Jobbágy EG, Jackson RB. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, **53**: 51–77
- [33] Ren S-J (任书杰), Cao M-K (曹明奎), Tao B (陶波), *et al.* The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A review. *Progress in Geography (地理科学进展)*, 2006, **25**(4): 58–67 (in Chinese)
- [34] Huang C-Y (黄昌勇). Pedology. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [35] Cleveland CC, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a ‘Redfield ratio’ for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, **85**: 235–252
- [36] Sterner RW, Elser JJ. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002
- [37] Han WX, Fang JY, Guo DL, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, **168**: 377–385
- [38] Li Z (李征), Han L (韩琳), Liu Y-H (刘玉虹), *et al.* C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2012, **36**(10): 1054–1061 (in Chinese)
- [39] Guo Z-W (郭子武), Chen S-L (陈双林), Yang Q-P (杨清平), *et al.* Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of *Phyllostachys praecox*. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2012, **32**(20): 6361–6368 (in Chinese)

作者简介 张立华,男,1980年生,助理研究员.主要从事土壤生态学研究. E-mail: lhzhang@yic.ac.cn

责任编辑 孙菊
