

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....	华 尔, 李 佳, 董 洁, 等 (3975)
植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系	黎 磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)
基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....	李继峰, 李仁杰 (3998)
基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....	杨 谨, 陈 彬, 刘耕源 (4007)
内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....	颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等 (4017)
典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....	裴 厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025)
长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....	巫 涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034)
厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性	姜 攀, 王明元 (4043)
Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系	贾 夏, 董岁明, 周春娟 (4052)
凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构	赵 丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062)
盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....	卢鑫萍, 杜 茜, 闫永利, 等 (4071)
菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响.....	张 林, 丁效东, 王 菲, 等 (4079)
闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....	王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等 (4087)
高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....	武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094)
模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响	吴 林, 苏延桂, 张元明 (4103)
铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化	濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114)
不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....	周 玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123)
基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....	张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132)
黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....	李 志 (4139)
莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....	邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146)
不同蚯蚓采样方法对比研究.....	范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154)
亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....	涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160)
黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....	赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166)
苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....	骆 颖, 凌 冰, 谢杰峰, 等 (4173)
长江口中国花鲈食性分析.....	洪巧巧, 庄 平, 杨 刚, 等 (4181)
基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....	苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191)
镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理	曹 慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)
北方草地牛粪中金龟子的多样性.....	樊三龙, 方 红, 高传部, 等 (4207)
合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....	杨 林, 郭 骅, 毕守东, 等 (4215)
植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....	张 跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228)
基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....	杨丽花, 佟连军 (4236)
基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....	齐 静, 陈 彬, 戴 婧, 等 (4246)
专论与综述	
水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述	章光新 (4254)
松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展	马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261)
一种新的景观扩张指数的定义与实现	武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)
研究简报	
华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....	李 倩, 王 明, 王雯雯, 等 (4278)
美丽海绵提取物防污损作用.....	曹文浩, 严 涛, 刘永宏, 等 (4285)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-07



封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106160817

王维奇,王纯,曾从盛,全川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.

Wang W Q, Wang C, Zeng C S, Tong C. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4087-4093.

闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷 生态化学计量学特征

王维奇^{1,2}, 王 纯³, 曾从盛^{1,2,*}, 全 川^{1,2}

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007;

3. 福州市金桥高级中学, 福州 350004)

摘要:为了阐明不同河段湿地土壤生态化学计量学特征及其指示意义,对闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳、氮、磷含量进行了测定与分析。结果表明:上游段芦苇湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 36.5—51.3、43.0—93.6 和 0.8—2.3, 平均值分别为 44.1、66.9 和 1.6;中游段湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 15.8—21.7、28.0—72.2 和 1.6—4.2, 平均值分别为 17.6、45.7 和 2.6;下游段湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 13.5—19.8、63.6—125.4 和 4.2—6.3, 平均值分别为 16.4、90.5 和 5.5;不同河段湿地的 3 种比值表现为不同的变化趋势,土壤 C/N 为上游段湿地>中游段湿地>下游段湿地, C/P 为下游段湿地>上游段湿地>中游段湿地, N/P 为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地;单一河段湿地不同土壤剖面 C/N、C/P 和 N/P 的变异性小于不同河段湿地之间的变异性;土壤水分含量和粉粒含量是影响不同河段湿地土壤 C/N、C/P、N/P 变化的最为关键的因子;不同河段湿地土壤 C/N 和 N/P 对厌氧碳分解过程具有良好的指示作用。

关键词:碳;氮;磷;化学计量学;湿地;闽江河口

Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary

WANG Weiqi^{1,2}, WANG Chun³, ZENG Congsheng^{1,2,*}, TONG Chuan^{1,2}

1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Research Center of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Fuzhou Jinqiao Senior Middle School, Fuzhou 350004, China

Abstract: Ecological stoichiometry is the study of the balance of energy and multiple chemical elements. Generally, this perspective examines the causes and consequences of elemental imbalances between resources, producers, and consumers in the environment. C, N and P are key elements controlling organism growth. However, the relative needs of the elements are poorly quantified, and dependencies between elements are not well investigated. These three elements are strongly coupled in their biochemical functioning. Furthermore, the ecological stoichiometry of C, N and P is the indication for organic carbon decomposition and nutrition limit.

The element ratios in wetlands, especially for the estuarine wetlands, appear to be more variable than other ecosystems worldwide. Moreover, the studies on soil C, N and P stoichiometry have not been thoroughly studied. In fact, soil as the carrier of organisms and elements plays very important roles. Therefore, studies on C, N and P ecological stoichiometry of wetland soils will be favorable to clarify the available of nutrition and the cycle and balance of C, N and P.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31000209);福建省公益类研究所专项(2011R1037-5);福建省教育厅资助项目(JB11030);福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金(fjsdky2012007)

收稿日期:2011-06-16; 修订日期:2011-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cszeng@fjnu.edu.cn

An amount of approximately 18,000 km of coastline in China is covered by an estimated 12,000 km² of tidal estuary wetlands. These tidal wetlands are generally rich in animal and plant biodiversity and appear to have important biogeochemical roles within the entire estuary ecosystem. One of these important tidal wetland ecosystems is found within the Minjiang River estuary in southeast China, which is located at the transition of mid- and southern subtropical climate zones in China.

Phragmites australis is the dominant species in Minjiang River estuarine wetland and distributes everywhere from upper reach to lower river. Here we chose the Youxizhou wetland, Bianfuzhou wetland and Shanyutan wetland as the study areas and examined the ecological stoichiometric characteristics of wetland soils in different river reaches and their indication. In upper reach, the values of soil C/N, C/P, N/P (0—60 cm) of *P. australis* wetland were 36.5—51.3, 43.0—93.6 and 0.8—2.3, with averages of 44.1, 66.9 and 1.6, respectively. In middle reach, the values of soil C/N, C/P, N/P (0—60 cm) were 15.8—21.7, 28.0—72.2 and 1.6—4.2, with averages of 17.6, 45.7 and 2.6, respectively. In lower reach, the values of soil C/N, C/P, N/P (0—60 cm) were 13.5—19.8, 63.6—125.4 and 4.2—6.3, with averages of 16.4, 90.5 and 5.5, respectively. C/N, C/P and N/P ratios appeared various tendencies among wetlands in different reaches. Soil C/N ratios were in the order of upper reach>middle reach>lower reach, C/P ratios were in the order of lower river >upper river>middle river, while N/P ratios were in the order of lower reach>middle reach>upper reach. The variation of C/N, C/P, N/P ratios in soil profile of single reach was smaller than that among different reaches. Soil water and silt contents were the key factors controlling the change of C/N, C/P, N/P ratios of wetland soils in different reaches. Soil C/N and N/P ratios were preferable indication for anaerobic carbon decomposition.

Key Words: carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometry; wetland; Minjiang River estuary

生态化学计量学为探究生物系统能量和多种元素的平衡提供了新的思路^[1],受到生态学家的广泛关注^[2-3]。与国外生态化学计量学研究的广度和深度相比,国内研究相对不足^[4]。目前,生态化学计量学的相关成果主要是对陆地生态系统和水生生态系统元素生态化学计量学开展的研究^[2,4],但对介于陆地和水生生态系统过渡带的湿地生态系统元素生态化学计量学的研究还十分有限,且大多数是对植物组织的元素生态化学计量学进行分析^[5],对于揭示养分的可获得性以及碳、氮、磷等元素的循环和平衡机制具有重要意义的土壤元素生态化学计量学研究并未给予同样的重视。

我国海岸线漫长,入海河流众多,河口湿地发育较为典型。河口区上游段向下游段经济发展水平由高到低,人为干扰方式由城市建设向人类捕捞海货和垦殖过渡,自然水文干扰为河川径流减弱,海流增强的趋势过渡。揭示在这一复杂情形模式下,土壤碳、氮、磷比是否会沿着河川径流方向递减,碳与养分比对土壤碳储量有怎样的指示作用等问题,可为采取有效方式增加土壤固碳潜力,减缓温室气体排放提供基础数据,但遗憾的是相关研究尚未见报道。

为此,本文对闽江河口不同河段湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征作一探讨,明确人类干扰和水盐入侵复杂情形下土壤碳、氮、磷比的特征,揭示碳与养分比与碳储量的联系,阐明随着土壤剖面深度的改变,该比值的变化范围及其与水平变异性的关系等,对促进生态化学计量学理论的发展和完善的具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽江为福建省境内最大的河流,流域面积约占福建省总面积的 50%,自竹歧以下至闽江入海处属于闽江河口区(119°5'36"—119°41'5"E, 25°50'43"—26°9'42"N),面积约 467.6 km²。闽江河口区气候属于中亚热带和南亚热带海洋性季风气候区的过渡区,年均气温 19.7℃,降水量为 1200—1740 mm,从竹歧至闽江入海处,天然湿地沿河流两岸高低河漫滩呈带状分布^[6]。天然植被主要有芦苇(*Phragmites australis*)、短叶荇菜

(*Cyperus malaccensis* var. *brevifolius*)、蘆草 (*Scirpus triqueter*) 和近几年外来入侵的互花米草 (*Spartina alterniflora*) 等, 芦苇在整个河口区湿地均有分布。闽江河口段潮汐特征表现为口外正规半日潮, 口内非正规半日浅海潮, 涨落潮流具有周期性变化, 盐度也随着潮汐变化而呈周期性变化, 从入海口到向陆方向呈现盐-淡水更替特征(表 1)。与此同时, 叠加着城市向乡村过渡的环境压力梯度, 为我们探讨这一复杂情形模式下的河口湿地碳、氮、磷生态化学计量学特征及其指示作用提供了理想的实验地。

表 1 闽江河口区盐-淡水梯度特征

Table 1 Saline-fresh water properties of Minjiang River estuary

土层深度 Soil depth/cm	土壤水含量 Soil water content/%			土壤盐度 Soil salinity/(mS/cm)		
	上游段 Upper reach	中游段 Middle reach	下游段 Lower reach	上游段 Upper reach	中游段 Middle reach	下游段 Lower reach
0—10	32.73±21.40	81.88±10.30	116.51±9.27	0.04±0.02	0.34±0.04	1.15±0.17
10—20	22.55±21.49	74.17±10.28	109.91±14.34	0.03±0.02	0.25±0.04	1.16±0.06
20—30	26.57±20.74	67.85±11.21	112.75±6.89	0.02±0.02	0.20±0.02	1.20±0.02
30—40	30.02±14.40	72.14±3.92	104.50±18.13	0.02±0.01	0.19±0.03	1.31±0.06
40—50	36.87±12.67	71.41±10.40	104.61±15.19	0.02±0.01	0.25±0.07	1.35±0.13
50—60	41.81±13.62	76.14±9.44	96.68±8.09	0.03±0.02	0.23±0.04	1.38±0.04
平均值 Averaged value	31.76±17.39	73.93±9.26	107.49±12.48	0.03±0.02	0.24±0.04	1.26±0.08

1.2 土壤取样和测定

2007 年 10 月在闽江河口上游段尤溪洲湿地(119°16′56.2″E, 26°02′57.7″N)、中游段蝙蝠洲湿地(119°31′42″E, 26°03′04″N)和下游段鳝鱼滩湿地(119°37′33.4″E, 26°01′47.2″N)芦苇植被下进行采样, 对每个样区(10 m×10 m)随机挖取 3 个剖面作为重复, 每个土壤剖面按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 和 50—60 cm 共分 6 层进行采样, 装入自封袋带回实验室, 去除杂质, 经自然风干后过 100 目孔筛, 实验待用。土壤有机碳、全氮和全磷分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏定氮法(K-370, 瑞士生产)和钼锑抗比色法(UV-2450, 日本生产), 土壤全盐含量和 pH 值采用电位法测定(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计), 土壤容重用环刀法进行测定, 土壤粒径用粒径分析仪(SEDIMAT4-12, 德国生产)测定, 土壤水含量用烘干法测定。此外, 土壤厌氧条件下的碳分解(即 CH₄ 和 CO₂ 产生)潜力(培养样品为风干土)测定方法为氮气置换形成良好的厌氧环境, 共培养 5 d, 并通过分析培养期内的 CH₄ 和 CO₂ 的浓度随培养时间的变化来计算其产生潜力^[7]。

1.3 土壤碳储量计算方法

土壤剖面第 i 层平均碳密度(C_i)和单位面积一定深度内(j 到 n 层)碳储量(T_c)用下式计算:

$$C_i = D_i \times M_c \quad (1)$$

$$T_c = \sum_{i=j}^n c_i \times d_i \quad (2)$$

式中, C_i 的单位为 kg/m³, T_c 的单位为 10 t/km², D_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³), M_c 为相应土层的碳含量(g/kg), d_i 为第 i 层厚度(cm)。

1.4 数据处理

应用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 统计分析软件对测定数据进行整理。原始数据的处理采用 Excel 2003, 对河口区不同河段芦苇湿地不同土层土壤 C/N、C/P、N/P 的差异性检验采用双因素方差分析, 土壤碳、氮、磷、含水量、盐度等因子与 C/N、C/P、N/P 的相关性分析采用 Pearson 相关分析。土壤 C/N、C/P、N/P 采用的是物质的量之比(mol/mol)。

2 结果与分析

2.1 不同河段芦苇湿地土壤碳、氮、磷含量及其相关性

碳、氮、磷是土壤中重要的生源要素。不同河段中尤溪洲(上游段)芦苇湿地 0—60 cm 土壤碳、氮、磷元

素的变化范围分别为 11.56—14.72 g/kg、0.28—0.37 g/kg 和 0.35—0.55 g/kg, 平均值分别为 12.47 g/kg、0.33 g/kg 和 0.52; 蝙蝠洲(中游段)芦苇湿地 0—60 cm 土壤碳、氮、磷元素的变化范围分别为 14.01—19.72 g/kg、0.85—1.45 g/kg 和 0.61—1.49 g/kg, 平均值分别为 16.62 g/kg、1.12 g/kg 和 1.04 g/kg; 鳝鱼滩(下游段)芦苇湿地 0—60 cm 土壤碳、氮、磷元素的变化范围分别为 20.93—22.89 g/kg、1.27—1.90 g/kg 和 0.44—0.93 g/kg, 平均值分别为 21.97 g/kg、1.60 g/kg 和 0.66 g/kg。湿地土壤碳、氮含量表现为上游段湿地<中游段湿地<下游段湿地($P<0.01$), 磷含量则表现为上游段湿地<下游段湿地<中游段湿地($P<0.05$)。综合分析不同河段湿地土壤碳、氮、磷含量变化范围分别 11.56—22.89 g/kg、0.28—1.90 g/kg、0.35—1.49 g/kg, 平均值分别为 17.02、1.02 和 0.74 g/kg, 变异系数为 24.7%、55.3% 和 44.2%, 元素空间变异性为碳<磷<氮。分析不同河段湿地 3 种元素的相互关联性发现, 整个河段芦苇湿地碳、氮元素间存在着极显著的相关关系($P<0.01$), 碳和磷、氮和磷元素之间相关性不显著($P>0.05$), 从元素在空间尺度上的变化趋势看, 碳氮元素的变化几乎是同步的, 磷的变化滞后于碳和氮(图 1)。

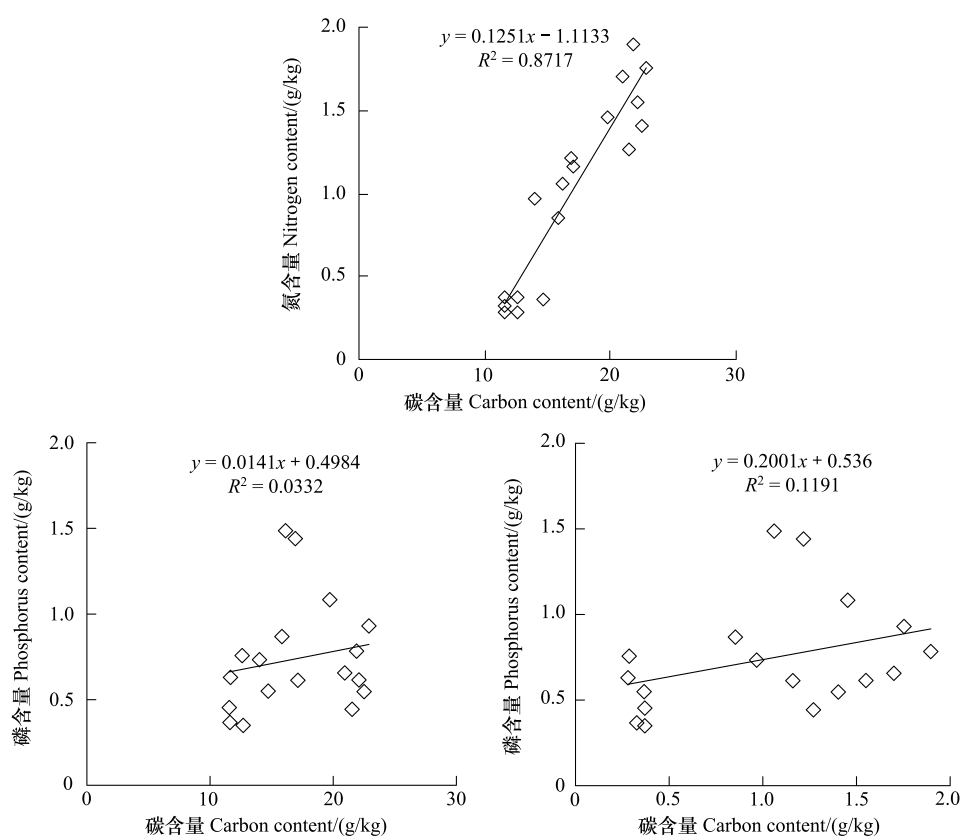


图 1 不同河段湿地土壤碳氮磷相关性

Fig. 1 Correlation of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different reaches wetland

2.2 不同河段湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征

上游段芦苇湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 36.5—51.3、43.0—93.6 和 0.8—2.3, 平均值分别为 44.1、66.9 和 1.6, 变异系数分别为 12.9%、29.0% 和 37.1%; 中游段湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 15.8—21.7、28.0—72.2 和 1.6—4.2, 平均值分别为 17.6、45.7 和 2.6, 变异系数分别为 11.2%、34.8% 和 36.3%; 下游段湿地 0—60 cm 土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 13.5—19.8、63.6—125.4 和 4.2—6.3, 平均值分别为 16.4、90.5 和 5.5, 变异系数分别为 15.2%、25.2% 和 13.1%; 综合分析不同河段湿地土壤 C/N、C/P 和 N/P 分别为 13.5—51.3、28.0—125.4 和 0.8—6.3, 平均值分别为 26.0、67.7 和 3.2, 变异系数分别为 52.4%、38.9% 和 57.3%。3 种比值表现为不同的变化趋势, 土壤 C/N 为上游段湿地>中游段湿地>下

游段湿地, C/P 为下游段湿地>上游段湿地>中游段湿地, N/P 为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地(图 2)。统计分析表明, 上游段湿地土壤 C/N 与中游段湿地和下游段湿地差异明显 ($P<0.05$), 中游段湿地和下游段湿地土壤 C/N 之间差异不显著 ($P>0.05$); C/P 和 N/P 均表现为上游段湿地、中游段湿地和下游段湿地之间存在显著的差异 ($P<0.05$)。从单一河段湿地土壤 C/N、C/P 和 N/P 随着剖面深度的变异系数来看, C/N 为下游段湿地>上游段湿地>中游段湿地, C/P 为中游段湿地>上游段湿地>下游段湿地, N/P 上游段湿地>中游段湿地>下游段湿地。单一河段湿地垂直剖面上的土壤 C/N、C/P 和 N/P 的变异性低于水平空间上不同河段之间湿地土壤 C/N、C/P 和 N/P 的变异性。

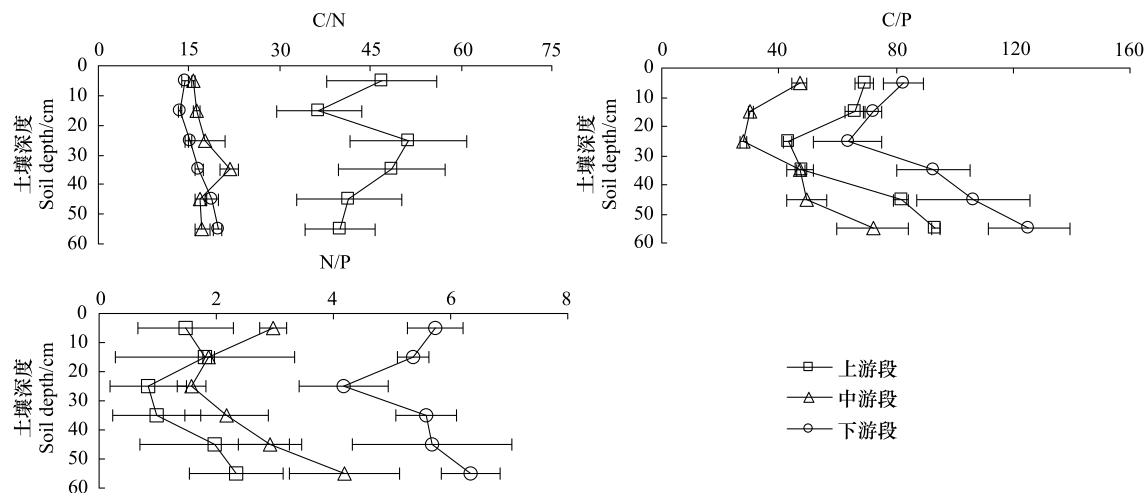


图 2 不同河段芦苇湿地土壤 C/N、C/P、N/P

Fig. 2 Dynamics of C/N, C/P, N/P ratios in different reaches wetland

2.3 影响土壤碳、氮、磷比变化的因子

在上游段湿地, 粉粒含量和砂粒含量是调节芦苇湿地土壤 C/N、C/P、N/P 的关键因子, 中游段湿地土壤水含量与 C/N、C/P、N/P 关系较为密切, 下游段湿地土壤 C/N、C/P、N/P 随着水含量、容重和盐度的变化而改变; 就 C/N 而言, 上游段、中游段和下游段芦苇湿地均受到磷含量和粉粒含量的控制, 而 C/P 和 N/P 与水含量的相关性最为显著; 不同河段芦苇湿地土壤 C/N、C/P、N/P 的差异是受到多因子的影响(表 2)。总体来看, 土壤水含量和粉粒含量是影响不同河段湿地土壤 C/N、C/P、N/P 变化的最为关键的因子。

表 2 C/N、C/P 和 N/P 与影响因子间的相关关系

Table 2 Correlation between C/N, C/P and N/P ratios and influencing factors

类型 Type	指标 Index	C	N	P	含水量 Water content	pH	容重 Bulk density	盐度 Salinity	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
上游段 Upper river	C/N	—	—	0.867 **	-0.134	0.041	-0.279	-0.271	-0.374	-0.502 *	0.505 *
	C/P	—	0.748 **	—	0.760 **	-0.417 *	-0.357	0.383	-0.284	0.868 **	-0.878 **
	N/P	-0.057	—	—	0.605 **	-0.311	-0.146	0.349	-0.101	0.792 **	-0.804 **
中游段 Middle river	C/N	—	—	-0.224	-0.431 *	-0.518 *	0.878 **	-0.716 **	-0.856 **	-0.878 **	0.899 **
	C/P	—	0.005	—	0.423 *	-0.212	-0.060	0.091	0.070	0.170	-0.161
	N/P	0.194	—	—	0.546 *	-0.053	-0.319	0.308	0.306	0.425 *	-0.420
下游段 Lower river	C/N	—	—	-0.777 **	-0.860 **	-0.870 **	0.751 **	0.968 **	-0.747 **	0.784 **	-0.185
	C/P	—	-0.943 **	—	-0.856 **	-0.771 **	0.711 **	0.877 **	-0.579 **	0.604 **	-0.134
	N/P	-0.687 **	—	—	-0.591 **	-0.395	0.451 *	0.520 *	-0.240	0.252	-0.059
不同河段 Different river reaches	C/N	—	—	-0.438 **	-884 **	0.787 **	0.873 **	-0.633 **	-0.881 **	-0.941 **	0.932 **
	C/P	—	0.186	—	0.329 **	-0.360 **	-0.294 *	0.605 **	0.329 **	0.216	-0.263 *
	N/P	0.861 **	—	—	0.867 **	-0.764 **	-0.844 **	0.927 **	0.877 **	0.789 **	-0.830

* 表示显著相关 ($P<0.05$); ** 表示极显著相关 ($P<0.01$); “—” 表示存在自相关关系, 不宜进行相关分析

2.4 土壤碳储量与厌氧碳分解特征

闽江河口上游段湿地、中游段湿地和下游段湿地 0—60 cm 土壤碳储量分别为 9205 t/km²、9289 t/km² 和 9415 t/km², 表现为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地。上游段湿地、中游段湿地和下游段湿地 0—60 cm 土壤平均 CO₂ 产生潜力分别为 21.838 μg CO₂·g⁻¹·d⁻¹、23.110 μg CO₂·g⁻¹·d⁻¹ 和 28.365 μg CO₂·g⁻¹·d⁻¹, CH₄ 产生潜力分别为 0.003 μg CH₄·g⁻¹·d⁻¹、0.005 μg CH₄·g⁻¹·d⁻¹ 和 0.006 μg CH₄·g⁻¹·d⁻¹, 总的碳分解潜力为 5.958 μg C·g⁻¹·d⁻¹、6.306 μg C·g⁻¹·d⁻¹ 和 7.741 μg C·g⁻¹·d⁻¹, 不同河段湿地土壤碳的分解潜力均表现为下游段湿地>中游段湿地>下游段湿地。可见, 不同河段土壤碳储量的大小关系与土壤厌氧碳分解潜力表现为一致的规律。此外, 在上游段、中游段和下游段湿地均表现为 CO₂ 是厌氧碳分解的主要产物。

3 讨论

3.1 土壤碳、氮、磷比的空间异质性

河口区不同河段湿地由于受到自然的潮汐和河川径流作用及其导致的水盐特征的差异, 并叠加以人类活动干扰方式和程度的变化, 使得这种情形模式下的土壤碳、氮、磷元素的循环过程更为复杂^[8], 相应的元素比也将发生变化。本研究中, 土壤 C/N 为上游段湿地>中游段湿地>下游段湿地, C/P 为下游段湿地>上游段湿地>中游段湿地, N/P 为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地, 3 个生态化学计量特征值在不同河段湿地之间的大小关系并未表现出一致的规律。不同河段湿地土壤 C/N、C/P 与 N/P 随着剖面变化而波动, 与水平方向上的变异性相比, 变化相对较小。虽然本研究中通过相关分析探讨了主导这种规律模式的影响因子, 综合分析结果显示, 这种规律的形成是多因子作用的结果(表 2)。因此, 今后应加强相关机理研究。

与此同时, 本研究中不同河段芦苇湿地土壤 C/N、C/P 与 N/P 的变异性表现为 N/P> C/N> C/P, C/N 具有较高的变异性这与作者之前的研究结论^[8]有所不同, 主要是因为本研究区选取的尺度相对较大, 而之前的研究区尺度较小。此外, 本研究发现, 碳含量和磷含量分别是决定不同程度干扰土壤 C/N 与 N/P 差异的关键因子, 这与 Tian 等^[9]的研究结论相似。

3.2 碳与养分比对土壤碳储量的指示作用

本研究中, 闽江河口不同河段芦苇湿地 0—60 cm 土壤 C/N 为上游段湿地>中游段湿地>下游段湿地, C/P 为下游段湿地>上游段湿地>中游段湿地, 碳储量表现为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地, 除中游段湿地和下游段湿地土壤 C/P 与土壤碳储量的变化趋势一致外, 碳与养分比值均未表现出对土壤碳储量良好的指示作用。王维奇等^[10]也得出了相似的结论, 并提出土壤容重在调节二者之间关系的重要性, 只有土壤容重相似, 碳与养分比才会对土壤碳储量具有良好的指示作用。本研究中, 上游段、中游段和下游段芦苇湿地 0—60 cm 土壤容重为 1.23、0.94 g/cm³ 和 0.72 g/cm³, 存在着显著差异 ($P<0.05$), 也可能是导致上、中、下游段湿地复杂情形模式下土壤碳与养分比并未很好地反映相应碳储量变化的原因。

与此同时, 我们探讨了垂直土壤剖面各层碳与养分比与土壤碳储量的关系, 总体来看, 较高的碳与养分比与较高的土壤碳储量数据相吻合, 特别是对于下游段湿地土壤 C/N 和 C/P 与土壤碳储量均呈极显著正相关 ($r=0.682$, $P<0.01$; $r=0.515$, $P<0.01$)。因此, 可得出结论, 即小尺度区域的碳与养分比对土壤碳储量具有良好的指示作用, 而相对较大尺度情形下, 这种相关性不显著。

3.3 土壤厌氧碳分解特征及其与土壤碳、氮、磷比的关系

本研究中, 不同河段湿地土壤碳的分解潜力均表现为下游段湿地>中游段湿地>上游段湿地, 这与土壤碳储量的变化趋势一致, 说明底物的数量在碳分解过程中具有重要作用。此外, 在上游段、中游段和下游段芦苇湿地均表现为 CO₂ 是厌氧碳分解的主要产物, 这与亚热带河口湿地本身的特性也存在着一定的联系。高的土壤发育水平, 使得土壤中铁、锰受体含量较高, 该区域工业污水的输入又带来了大量的硝酸盐受体, 海水的入侵同时注入了高浓度的硫酸盐受体, 这些非氧气的电子受体在碳分解过程中发挥了重要作用。这些电子受体的存在, 一方面可以一定程度上控制 CH₄ 的产生^[11], 另一方面电子受体的还原过程伴随着 CO₂ 的产生^[12], 因此, 在电子受体含量比较丰富的条件下, CO₂ 成为了更为主要的碳分解产物。此外, 作为 CH₄ 产生的最重要途

径,醋酸产 CH_4 过程也伴随着 CO_2 的产生,其化学计量学比率是 1:1,甲醇、三甲胺和甲硫氨酸分解的 CH_4 产生途径也有一定的 CO_2 产生^[13]。另外,新近的研究表明^[14],在电子受体和 CH_4 丰富的沉积中存在着 CH_4 的厌氧氧化过程, CH_4 被氧化并释放出 CO_2 ,这也可能是厌氧碳分解过程中 CO_2 产物较高的原因之一。

碳、氮、磷元素的计量学理论可为阐明不同河段湿地土壤间厌氧碳分解速率的差异提供有效的手段。很多研究表明,C/N 可以作为预测有机质分解速率的一个很好的指标,一般来说,与其分解速率呈反比^[15],王维奇等^[16]研究表明,湿地壤质土的 C/N 低于砂土,也是壤质土具有较高的厌氧碳分解速率的原因之一。本研究中,同样得出碳分解特征与 C/N 的变化趋势相反的结论,与此同时,还发现碳分解特征与 N/P 的变化趋势一致,但其对湿地土壤微生物生长过程和养分动态的影响,是否也存在与 C/N 一致的规律,尚有待于定量化的研究。

致谢:本研究在野外采样和室内样品分析过程中得到了福建师范大学贾瑞霞、刘白贵、闫宗平等同学的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [3] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(1): 153-170.
- [4] Gao S P, Li J X, Xu M C, Chen X, Dai J. Leaf N and P stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 947-952.
- [5] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534.
- [6] Liu J Q, Zeng C S, Chen N. Research of Minjiang River Estuary Wetland. Beijing: Science Press, 2005.
- [7] Wang W Q, Zeng C S, Tong C. Effects of water-salinity properties and plant invasion on estuarine wetland soil methane production potential. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, 25(4): 481-786.
- [8] Wang W Q, Zeng C S, Zhong C Q, Tong C. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in Minjiang River estuarine wetland. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [9] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [10] Wang W Q, Tong C, Jia R X, Zeng C S. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 238-242.
- [11] Wang W Q, Zeng C S, Tong C. Reviews on electron acceptors of controlling methane production from wetlands. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 300-306.
- [12] van der Nat F J W A, Middelburg J J. Seasonal variation in methane oxidation by the rhizosphere of *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris*. *Biogeochemistry*, 1998, 43: 79-104.
- [13] Oremland R S, Polcin S. Methanogenesis and sulfate reduction: competitive and noncompetitive substrates in estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 44(6): 1270-1276.
- [14] Beal E J, House C H, Orphan V J. Manganese- and iron-dependent marine methane oxidation. *Science*, 2009, 325(5937): 184-187.
- [15] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [16] Wang W Q, Tong C, Zeng C S. Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and anaerobic carbon decomposition of wetland soil of different texture. *China Environmental Science*, 2010, 30(10): 1130-1134.

参考文献:

- [4] 高三平,李俊祥,徐明策,陈熙,戴洁. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 947-952.
- [6] 刘剑秋,曾从盛,陈宁. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 王维奇,曾从盛,全川. 水、盐梯度及外来植物入侵对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响. *农业系统科学与综合研究*, 2009, 25(4): 481-786.
- [8] 王维奇,曾从盛,钟春棋,全川. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响. *环境科学*, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [10] 王维奇,全川,贾瑞霞,曾从盛. 不同淹水频率下湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 238-242.
- [11] 王维奇,曾从盛,全川. 控制湿地甲烷产生的主要电子受体研究进展. *地理科学*, 2009, 29(2): 300-306.
- [15] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [16] 王维奇,全川,曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1130-1134.

CONTENTS

Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments	HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)
Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for <i>Fagopyrum esculentum</i> populations	LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)
Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity	LI Jifeng, LI Renjie (3998)
Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem: a case study of Gongcheng county	YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)
Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia	YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)
Soil conservation value flow processes of two typical grasslands	PEI Sha, XIE Gadi, LI Shimei, et al (4025)
Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old <i>Pinus massoniana</i> forest ecosystem in Changsha City, China	WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)
Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen	JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)
Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity	JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)
The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve	ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)
Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils	LU Xinping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)
The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria <i>Bacillus megaterium</i> C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake	ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)
Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of <i>Phragmites australis</i> wetlands in different reaches in Minjiang River estuary	WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)
Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region	WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)
Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China	WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)
Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of <i>Dendrobium candidum</i> tissue culture seedlings during transplantation	PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)
Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland	ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)
Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model	ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)
Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009	LI Zhi (4139)
Eco-physiological responses of <i>Phragmites australis</i> to different water-salt conditions in Momoge Wetland	DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146)
Comparative study of different earthworm sampling methods	FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)
Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, <i>Ostrinia furnacalis</i> Guenée (Lepidoptera: Crambidae)	TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)
Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe	ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)
Inhibition effects of ethyl acetate extracts of <i>Momordica charantia</i> leaves on the experimental population of <i>Spodoptera litura</i>	LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)
Feeding habits of <i>Lateolabrax maculatus</i> in Yangtze River estuary	HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)
Genetic structure of <i>Gymnodontichus pachycheilus</i> from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region	SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)
Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog <i>Rana nigromaculata</i>	CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)
The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China	FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)
Spatial relationships among <i>Empoasca vitis</i> (Gothé) and <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban	YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)
Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve	ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)
Research of typical EIPs based on the social network analysis	YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)
Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi	QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)
Review and Monograph	
The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review	ZHANG Guangxin (4254)
Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain	MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261)
A new landscape expansion index: definition and quantification	WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)
Scientific Note	
Response of photosynthetic characteristics of <i>Psathyrostachys huashanica</i> Keng to drought stress	LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)
The antifouling activities of <i>Callyspongia</i> sponge extracts	CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 13 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元