

DOI: 10.5846/stxb201901210159

杨荣, 塞那, 苏亮, 尚海军, 刘永宏, 郭永盛. 内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征. 生态学报, 2020, 40(7): 2205-2214.
Yang R, Sai N, Su L, Shang H J, Liu Y H, Guo Y S. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of the Yellow River wetland in Baotou, Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2205-2214.

内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征

杨 荣^{1,2}, 塞 那³, 苏 亮³, 尚海军¹, 刘永宏¹, 郭永盛^{1,*}

1 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010

2 内蒙古自治区农业大学林学院, 呼和浩特 010019

3 包头市生态湿地保护管理中心, 包头 014010

摘要:为探究内蒙古包头黄河湿地土壤空间分布特征、生态化学计量学特征及其指示意义,以黄河包头段沿线从东到西的 3 种典型类型共 6 块湿地为研究对象,对其不同土层土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)化学计量特征及环境因素进行研究分析。结果表明:1) SOC、TN 和 TP 平均值分别为 11.20、0.42、0.98 g/kg, SOC、TN 含量随土层深度增加而垂直波动减小, TP 含量垂直方向上差异不显著。2) 土壤 C/N、C/P、N/P 平均值分别为 25.39、9.26、0.37, 与中国淋溶土、干旱土和沼泽湿地土壤相比, 包头市黄河湿地土壤 TN 含量、C/P 和 N/P 较低, TP 含量较高。3) 相关性分析结果显示, 土壤 TN 与 SOC、TP、N/P 和 C/P 具极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 C/N 相关性不显著; 土壤 TP 与 SOC、TN、C/N 和 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 N/P 相关性不显著, TP 含量高但有效性较低, TN 含量及其有效性可能是限制包头黄河湿地土壤碳、氮、磷等元素循环及其生态化学计量特征的关键因子。研究结果将为包头黄河湿地的植被重建、生态修复和科学管理提供理论依据。

关键词: 包头黄河湿地; 碳; 氮; 磷; 生态化学计量

Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of the Yellow River wetland in Baotou, Inner Mongolia

YANG Rong^{1,2}, SAI Na³, SU Liang³, SHANG Haijun¹, LIU Yonghong¹, GUO Yongsheng^{1,*}

1 Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China

2 College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

3 Baotou City Ecological Wetland Protection and Management Center, Baotou 014010, China

Abstract: To explore the spatial distribution characteristics and ecological stoichiometric characteristics of the Yellow River wetland in Baotou, Inner Mongolia, we collected the soil samples in different depths of six wetlands of three typical types from east to west along the Baotou section of the Yellow River in this study. We analyzed soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and the relationship between ecological stoichiometry characteristics and environmental factors. The results indicated that: 1) the average values of the SOC, TN and TP in soil of the wetland were 11.20 g/kg, 0.42 g/kg and 0.98 g/kg, respectively. The contents of SOC and TN in the vertical direction had a decreasing trend with increasing soil depth. There's no significant difference of the contents of TP in different soil layers. 2) The average values of soil C/N, C/P, and N/P were 25.39, 9.26, and 0.37, respectively. Compared with alfisols and aridisols in China and other marsh wetlands, the contents of TN, the values of C/P and N/P in Yellow River wetland of Baotou were

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2016MS0373, 2013MS0618); 内蒙古包头黄河湿地生态系统国家定位观测研究站(2017-LYPT-DW-007)

收稿日期: 2019-01-21; **网络出版日期:** 2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gys2050722@126.com

lower, and the content of TP was higher. 3) The correlation analysis showed that soil total nitrogen was significantly positively correlated with soil organic carbon, total phosphorus, N/P and C/P ($P < 0.01$), but not significantly correlated with C/N. The soil total phosphorus was significantly positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen, C/N, and C/P ($P < 0.01$), but not significantly correlated with N/P. TP content was higher but its effectiveness was lower. Soil total nitrogen content and its availability may be the main factor limiting the carbon, nitrogen, phosphorus, and other elements circulation and ecological stoichiometric characteristics in the Yellow River wetland in Baotou. Our results will provide the theoretical basis for vegetation reconstruction, ecological restoration, and scientific management of the Yellow River wetland in Baotou.

Key Words: Yellow River wetland in Baotou; carbon; nitrogen; phosphorus; ecological stoichiometry

生态化学计量学是通过研究生态过程中各化学元素比例关系及其随生物、非生物等环境因子的变化规律,揭示各元素在生态过程中的耦合关系和共变规律^[1-3]。碳(C)、氮(N)、磷(P)作为生物体重要元素组成以及土壤重要的结构和养分元素^[4],它们的生态化学计量学特征在探究生物系统的物质能量循环、养分限制以及多元素平衡过程中具有重要作用^[5]。土壤的空间异质性、发育时间、气候带、植被、水文等综合环境因素,都将直接或者间接影响土壤中 C、N、P 的物质循环过程,从而形成不同的化学计量学特征^[6]。而关于生态化学计量学的实验研究,近年来在国内得到了迅速发展,主要集中在区域 C:N:P 生态化学计量学特征及其驱动因素方面,以森林生态系统和草原生态系统的研究成果居多^[7]。

湿地作为自然界生产力最高的生态系统之一,水陆生态系统之间的过渡带,水陆交互作用强烈,具有独特的生物地球化学循环模式,其生态系统特征与其他系统也存在明显的差别,因此,应特别重视^[7]。2005 年始,我国湿地生态系统化学计量学逐渐在三江平原^[8]、河口^[5,9-10]、滨海湿地^[11]、沼泽^[12]、湖泊^[13]以及人工^[14]等湿地开展了研究,关于黄河湿地生态化学计量学的研究则多集中在黄河三角洲^[14-17],这对于系统认识整个黄河流域湿地黄河水质、泥沙等对各元素生态系统化学计量学特征及影响因素远远不够。内蒙古包头黄河湿地因特殊地理位置、气候特征和水文地质条件,成为了稀缺的内陆半干旱高纬度的城市河流湿地生态系统^[18]。它是由黄河改道形成,紧邻城市,湿地内以河流湿地、沼泽湿地为主^[19]。由于包头市位于干旱半干旱区,且包头黄河湿地紧邻城市中心,受灌溉、农田用水、工业废水、人类活动干扰等综合因素影响,使得包头黄河湿地具有水分蒸发量大,土壤盐碱化严重,人类活动影响大等特点,包头湿地富营养化问题也备受学者关注^[20]。本研究结合黄河在包头市内流经路线,从东到西沿线选择 3 大类 6 个不同特色类型湿地,以土壤 C、N、P 为研究对象,创新性将包头黄河湿地与其他黄河湿地、我国生态系统淋溶土、干旱土、沼泽湿地生态系统的土壤 C、N、P 化学计量学特征进行全面比较,探讨包头黄河湿地土壤内部 C、N、P 生态化学计量学特征。研究结果可以为包头黄河湿地生态恢复、湿地高效利用与保护提供科学依据,对完善和补充我国黄河沿线湿地生态系统土壤养分平衡和生态化学计量特征数据也具有重要科学价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古包头黄河湿地(40°14'39"N—40°33'20"N, 109°25'51"E—111°1'36"E)位于包头市南侧,黄河北岸,东至八里弯,南临鄂尔多斯市,西接巴彦淖尔市,北至黄河大堤以北 2 km;全长约 220 km,总面积为 29339 hm²,占全市湿地面积的 81.4%^[19](图 1)。包头黄河湿地自西向东分别为昭君岛片区、小白河片区、南海湖片区、共中海片区、敕勒川片区,包括河流湿地、沼泽湿地、湖泊湿地和季节性积水人工湿地等类型,属黄河冲积下的形成的湿地平原,地处半干旱草原地带,典型的大陆性季风气候,年均气温 8.5℃,全年无霜期 148 d,年日照时数为 2955—3255 h,年均降水量 307.4 mm,水面年蒸发量 2342 mm^[21]。土壤类型为草甸土、沼泽土、盐碱土和风沙土,土壤表层以粉状沙粒为主,深层土壤以黏质颗粒为主^[22],地下水位较浅(1 m 左右),pH 值在

7.3—9.0 之间,呈碱性^[23]。

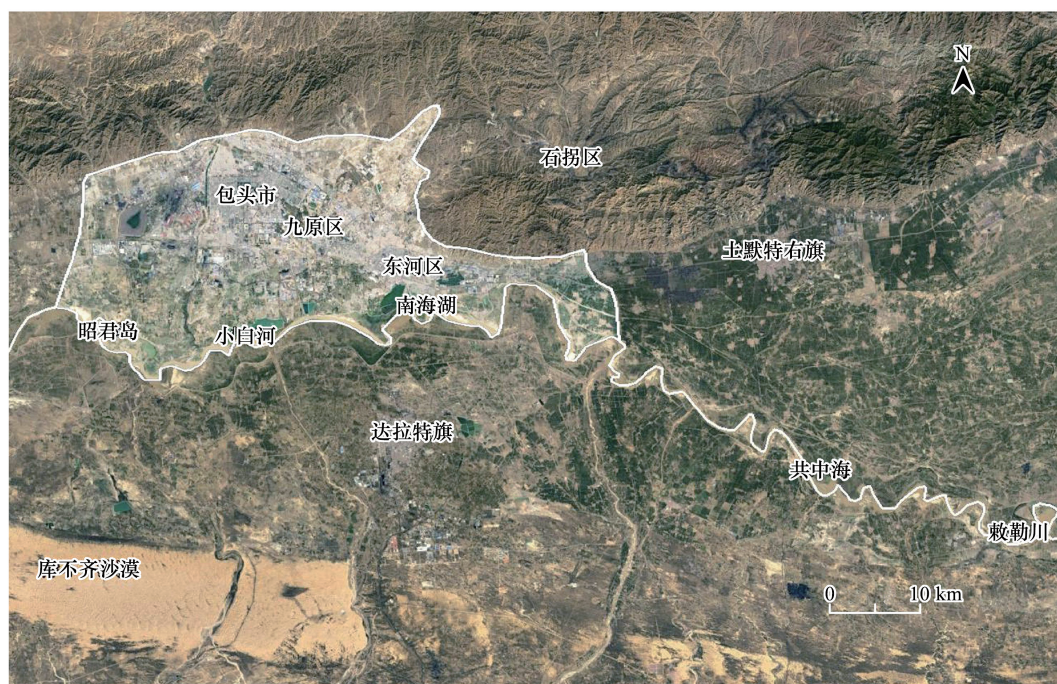


图 1 包头黄河湿地项目区区位图

Fig.1 The location map of Yellow River wetland in Baotou

1.2 分析方法和数据处理

1.2.1 土壤样品的采集与处理

2016 年 6 月,依据包头黄河各湿地积水情况和植物群落的不同,按照从西到东实地踏查,选择研究区最具有代表性和特色的 3 类湿地共 6 块样地,分别为昭君岛季节性积水区(Y1)、昭君岛常年积水区(Y2)、小白河季节性积水区(Y3)、四道沙河常年积水区(Y4)、南海子季节性积水区(Y5)和南海子常年积水区(Y6)共 6 个采样区,各样地基本情况见表 1。其中,昭君岛属于河流型湿地,为研究区的最西端;小白河是黄河湿地包头段较大的人工湖;四道沙河为河流型湿地,该地段人为活动多;南海子属于湖泊型湿地,是黄河流域较大的牛轭湖,依靠黄河补水供水^[18]。

为降低短期降水对数据的影响,雨季后采样。2016 年 11 月,用 GPS 获取样地的坐标,分别于 6 块湿地里各确定一个 100 m×100 m 的固定样地,样地四周立标志桩,围封。每块样地随机选取 3 个土壤剖面作为重复。按 0—10、10—20、20—40、40—60 cm 分层取样,各相同土层样品均匀混合,分别装入带编号的密封袋中带回实验室,去除杂质,经自然风干后,磨细过筛备用(测土壤 pH、过 20 目筛;测土壤有机碳、全氮和全磷含量过 100 目筛)。采样同时,用环刀法取样,带回测定土壤容重和含水量。土壤有机碳、全氮和全磷含量分别采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 消煮法、凯氏定氮法和钼锑抗分光光度法测定;土壤酸碱度(pH)、含水量分别采用电位法、烘干法测定。

1.2.2 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件进行数据统计和比较分析,用单因方差分析(One-way ANOVA)进行差异显著性分析。并采用 Duncan 法进行多重比较,以 T 检验,判断测定指标差异是否显著。土壤碳、氮、磷、含水量、容重等因子与 C/N、C/P、N/P 的相关性分析采用 Pearson 相关分析。采用 Excel 2010 进行数据作图。

表 1 研究区样地概况

Table 1 Basic condition of study plots

湿地编号 Wetland number	湿地名称 Wetland name	湿地类型 Wetland type	海拔 Altitude/m	经纬度 Latitude and longitude	优势植被 Dominant plants	土壤特点 Soil characteristics	备注 Note
Y1	昭君岛季节性 积水区	河流湿地	1003	109°38'43" E 40°32'41.1" N	尖叶盐爪爪 (<i>Kalidium cuspidatum</i> (Ung.-Stemb.) Grub.)、碱蓬 (<i>Suaeda glauca</i>)、莎蓬 (<i>Agriophyllum squarrosum</i> (L.) Moq)、怪柳 (<i>Tamarix chinensis</i> Lour.)	0—40 cm 草甸栗钙土, 40 cm 处现沙壤土	典型盐沼地, 连续 3 年无黄河水流入
Y2	昭君岛常年积水区	河流湿地	1001	109°40'38" E 40°31'25" N	扁秆藨草 (<i>Scirpus planiculmis</i> Fr. Schmidt)、中间型荸荠 (<i>Heleocharis intersita</i> Zinserl.)、羊草 (<i>Leymus chinensis</i> (Trin.) Tzvel.)、隐花草 (<i>Crypsis aculeata</i> (Linn.) Ait.)	0—70 cm 粘壤土, 70 cm 以下沙壤土	2016 年 6 月样地全部积水, 11 月积水消退。邻农田
Y3	小白河季节性积水区	人工湿地	992	109°46'55" E 40°32'37" N	碱蓬 (<i>Suaeda glauca</i>)、蛛丝蓬 (<i>Halogeton arachnoideus</i> Moq.)、赖草 (<i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel.)、刺藜 (<i>Chenopodium aristatum</i> L.)、拂子茅 (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth)、猪毛菜 (<i>Salsolacollina</i> Pall.)	碱性沙土	季节性积水明显
Y4	四道沙河常年积水区	河流湿地	992	109°52'53" E 40°31'32" N	芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、长芒稗 (<i>Echinochloa caudata</i> Roshev.)、狭叶酸模 (<i>Rumex stenophyllus</i> Ledeb.)	草甸土	常年积水, 60 cm 处见水, 近公路, 无农田相邻
Y5	南海子季节性积水区	湖泊湿地	974	109°59'39" E 40°31'38" N	芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、扁秆藨草 (<i>Scirpus planiculmis</i> Fr. Schmidt)	栗钙土	无农田相邻
Y6	南海子常年积水区	湖泊湿地	1004		香蒲 (<i>Typha orientalis</i> Presl.)、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、铁杆蒿 (<i>Tripolium vulgare</i> Nees)、牻牛儿苗 (<i>Erodium stephanianum</i> Willd.)	草甸土	紧邻农田

2 结果与分析

2.1 不同类型湿地的土壤理化性质

包头黄河湿地水土壤基本理化性质见表 2。研究区域均为盐碱地, 常年积水情况不同, 土壤理化性状也不同(表 2)。6 处湿地的容重范围为 1.01—1.49 g/cm³, 容重比较为 Y5>Y3>Y2>Y1>Y4>Y6; 含水量变化范围为 23.63%—57.32%, 各湿地之间比较顺序为 Y6> Y4> Y2> Y5> Y3> Y1; pH 值变化范围为 7.46—8.64, 研究区土壤整体偏碱性, pH 高于中国湿地 pH 范围(6. 5—7. 5)^[14]; 研究区湿地土壤含盐量在 1.13—15.66 g/kg 之间, 不同湿地间含盐量差异显著。整体而言, 常年积水性湿地土壤容重较低, 含水量较高, pH 值较低。季节性积水湿地土壤裸露, 土壤水分蒸发较大, 土壤全盐量较高, pH 值高。

表 2 包头黄河湿地不同类型湿地的土壤容重、含水量和 pH 值

Table 2 The bulk density, water content and pH of soils in different wetlands of the Yellow River wetlands in Baotou

湿地编号 Wetland number	容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	含水量 Water percentage/%	全盐量 Total salt content/(g/kg)	pH
Y1	1.39a	23.63a	15.66a	8.19bc
Y2	1.40a	34.03a	1.30bc	8.07c
Y3	1.47a	24.88a	1.80bc	8.64a
Y4	1.13b	47.55b	1.13c	8.05c
Y5	1.49a	28.50a	2.08bc	8.31b
Y6	1.0 b	57.32b	6.32b	7.46d

表中字母表示同列不同样地差异显著 (P<0.05)

2.2 不同湿地间土壤有机碳、全氮、全磷含量及垂直剖面分布特征

包头黄河各类型湿地土壤 SOC、TN、TP 含量变化范围较大,土壤 TN 含量比较低,变异系数较大,SOC、TP 含量相对丰富,变异系数较小(表 3)。各湿地 0—60 cm 土壤 SOC 含量范围为 3.15—30.39 g/kg,均值为 8.98 g/kg,水平分布差异明显;TN 范围为 0.15—1.14 g/kg,均值为 0.34 g/kg,不同类型湿地土壤 0—10 cm 表层 TN 含量差异较大(图 2);TP 为 0.59—1.96 g/kg,均值为 0.86 g/kg,各湿地有 SOC、TN、TP 变异系数分别为 21.36%、37.38%、12.30%。垂直剖面上,土壤 SOC、TN 和 TP 含量均随土层深度增加呈现垂直波动减小的变化规律(图 1)。除昭君岛季节性积水湿地、昭君岛常年积水湿地 SOC 含量垂直方向上下降趋势不太明显外,其他四个湿地的 SOC 含量下降趋势均较大,并且不同层次土壤 SOC 含量差异显著,峰值出现在 0—10 cm 土层,同一区域常年积水型湿地 SOC 含量高于季节性积水型湿地。TN 含量在小白河季节性积水区、四道沙河常年积水区、南海子常年积水区样地各土层间差异性显著,在昭君岛季节性积水区、昭君岛常年积水区、南海子季节性积水区各土层间差异不显著;除南海子季节性积水区外,各湿地 TN 含量峰值出现在 0—10 cm 土层,同一区域常年积水型湿地 TN 含量显著高于季节性积水型湿地。TP 含量在小白河季节性积水区、四道沙河常年积水区、南海子常年积水区样地 0—10 cm 土层较高,在其他各样地各层间差异性不显著。

表 3 不同类型湿地 0—60 cm 土层土壤 SOC、TN、TP 及其统计学特征

Table 3 Statistical characteristics contents of SOC, TN and TP in depth of 0—60 cm soil layers in different wetlands

湿地编号 Wetland number	有机碳 Soil organic carbon SOC/(g/kg)			全氮 Total nitrogen TN/(g/kg)			总磷 Total phosphorus TP/(g/kg)		
	平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
Y1	5.07b	1.18	23.25	0.24b	0.09	40.20	0.60b	0.071	11.78
Y2	4.41b	1.15	26.01	0.24b	0.11	45.68	0.61b	0.041	6.66
Y3	3.15b	0.74	23.62	0.15b	0.05	33.62	0.59b	0.038	6.42
Y4	9.65b	1.73	17.93	0.22b	0.07	33.70	0.97b	0.149	15.35
Y5	4.49b	1.06	23.53	0.16b	0.08	51.00	0.68b	0.129	18.89
Y6	30.39a	6.15	20.23	1.14a	0.48	42.14	1.96a	0.371	18.93

图中字母表示同列不同样地间差异显著($P<0.05$)

2.3 不同湿地的 C、N、P 生态化学计量特征

包头黄河湿地土壤 C、N、P 化学计量比在不同类型湿地间存在显著差异($P<0.05$)(表 4)。整体而言,包头黄河湿地土壤碳氮比(C/N)为 18.26—36.02,均值为 25.39,四道沙河常年积水湿地 C/N 显著高于其他湿地;土壤碳磷比(C/P)为 4.99—8.84,均值 9.26,昭君岛季节性积水湿地、四道沙河常年积水湿地、南海子常年积水湿地 C/P 显著高于其他湿地;包头黄河湿地的氮磷比(N/P)整体偏低,范围在 0.2—0.39 之间,均值为 0.37,昭君岛季节性积水湿地、昭君岛常年积水湿地、南海子常年积水区湿地 N/P 显著高于其他湿地。

表 4 不同湿地土壤的 C/N、C/P、N/P 的比值

Table 4 Ratios of C/N, C/P and N/P for soil from different wetlands

比值 Ratios	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
C/N	21.56±0.65bc	18.26±1.24c	21.08±0.80 bc	36.02±2.16a	27.30±0.79 b	22.49±1.51bc
C/P	8.47±0.58a	7.17±0.42bc	4.99±0.23 d	7.91±0.30ab	6.62±0.22 c	8.84±0.5 a
N/P	0.39±0.016a	0.39±0.016a	0.24±0.08 b	0.20±0.05b	0.24±0.02 b	0.38±0.07a

数据为平均值±标准差,同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.4 土壤 C、N、P 生态化学计量比与土壤各因子的相关性

土壤理化性质通过影响植物群落的生长和演替,进而影响土壤中各元素的含量及其分布^[24]。由表 4 获知,包头黄河湿地土壤 SOC 仅与 N/P 不相关($P>0.05$),与其他碳氮磷化学计量特征具有极显著正相关性($P<0.01$);TN 与 SOC、TP、N/P 和 C/P 具极显著正相关($P<0.01$),与 C/N 相关性不显著;TP 与 SOC、TN、C/N 和

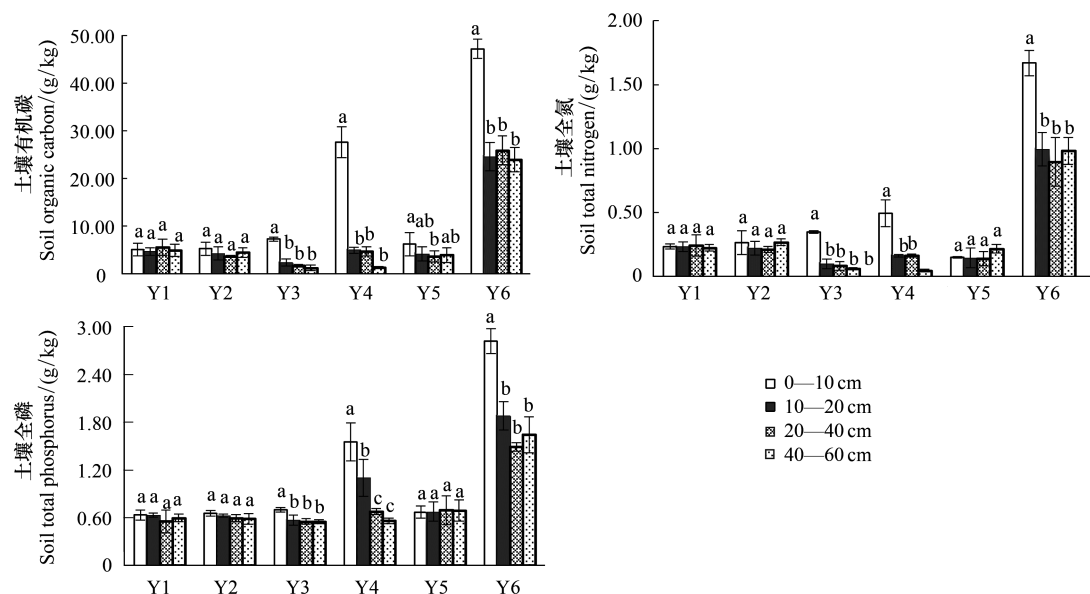


图2 不同类型湿地土壤有机碳、全氮及全磷的空间分布特征

Fig.2 The spatial distribution characteristics of soil TOC, TN and TP in different wetlands

图中不同字母表示同一类地不同土层间差异显著 ($P < 0.05$); Y1: 昭君岛季节性积水型湿地; Y2: 昭君岛常年积水型湿地; Y3: 小白河季节性积水型湿地; Y4: 四道沙河常年积水型湿地; Y5: 南海子季节性积水型湿地; Y6: 南海子常年积水型湿地

C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 N/P 相关性不显著。样地土壤物理性质与土壤 C、N、P 化学计量比之间均表现出一定的相关性。土壤含水量与 SOC、TN、TP、C/N 和 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 N/P 相关性不显著; 土壤 pH 与 SOC、TN、TP、C/N、N/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 和 C/P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 土壤容重和 TP、C/N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与其他化学计量特征之间负相关, 但相关性不显著。

表5 土壤 TN、TP、C/N、C/P、N/P 与土壤理化因子的相关性

Table 5 The correlation coefficients between TN, TP and C/N, C/P, N/P ratio of soil physical and chemical factors

项目 Item	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P	pH	土壤含水量 Soil water percentage	土壤容重 Soil bulk density
SOC		0.814 **	0.863 **	0.765 **	0.858 **	0.207	-0.466 *	0.814 **	-0.56
TN	0.814 **		0.568 **	0.323	0.932 **	0.551 **	-0.440 *	0.521 **	-0.379
TP	0.863 **	0.568 **		0.791 **	0.565 **	-0.102	-0.422 *	0.873 **	-0.764 **
C/N	0.765 **	0.323	0.791 **		0.528 **	-0.182	-0.430 *	0.777 **	-0.581 **
C/P	0.858 **	0.932 **	0.565 **	0.528 **		0.540 **	-0.528 **	0.561 **	-0.40
N/P	0.207	0.551 **	-0.102	-0.182	0.540 **		-0.425 *	-0.045	0.025

** 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。* 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

2.5 包头市黄河湿地与国内其他湿地营养状况的比较

将包头黄河湿地 0—60 cm 土层中的 TN、SOC、TP、C/N、C/P 和 N/P 与中国淋溶土壤、中国干旱土壤、中国沼泽湿地土壤以及黄河沿线的其他典型湿地进行比较。结果表明, 包头市黄河湿地土壤的 TN 含量、C/P 和 N/P 值, 低于中国淋溶土、中国干旱土、中国沼泽湿地和其他典型湿地的平均值; TP 含量和 C/N 值高于中国淋溶土、中国干旱土、中国沼泽湿地和其他典型湿地的平均值; 而其 SOC 含量为 11.20 g/kg, 远高于黄河三角洲和宁夏湿地的 SOC 含量 (表 6)。

表 6 包头黄河湿地土壤中 C、N、P 含量及其比值与国内其他湿地的比较

Table 6 The comparison of contents of C, N, P in the soil and their ratios of the Yellow River wetlands in Baotou and other wetlands in China

湿地名称 Wetland name	TN/(g/kg)	SOC/(g/kg)	TP/(g/kg)	C/N	C/P	N/P	土壤深度 Soil depth/cm	参考文献 References
黄河三角洲 Yellow River Delta	0.47—1.27	4.33—7.74	0.43—0.63	6.71—12.31	25.76	2.09	表层	[14-17]
宁夏湿地 Ningxia plain	0.90	8.6	0.43	10.28—12.87	18.68—25.22	1.55—2.14	0—40	[25]
中国淋溶土壤 China mollisols	—	—	—	12.1±0.24	63.5±2.6	5.46±0.29	0—10	[26]
中国干旱土壤 China aridisols	—	—	—	11.24±0.22	29.0±1.8	2.60±0.15	0—10	[26]
中国沼泽湿地 Chinese wetland	—	—	—	18.22±7.51	245.22±227.52	13.60±16.81	—	[27]
包头黄河湿地 Yellow River in Baotou	0.42	11.20	0.98	25.39	9.26	0.37	0—60	本研究

3 讨论

3.1 包头黄河不同类型湿地土壤有机碳、全氮和全磷含量特征

C、N、P 不仅是表征土壤肥力水平的重要元素,在探究限制土壤生产力元素平衡和生物系统能量平衡过程中也起着重要作用^[28-29]。生态系统中 C、N、P 等元素的循环是相互耦合,相互平衡的^[30],在相对稳定的条件下,生态系统内元素的储量以及化学计量特征是由质量守恒原理和其他关键元素(如氮、磷等)的供应控制的^[31]。土壤 C、N、P 化学计量特征因受到地貌、气候、植被、土壤动物和人类活动的多因素影响,外加包头黄河湿地供水主要依赖于黄河干流的供给或其渗漏地下水的补给,以及黄河河床对地下水的侧向补给,环境均一性较差,故其土壤 C、N、P 空间变异性较大^[32]。本研究中 SOC、TN 含量在不同类型湿地 0—10 cm 土层含量均显著高于其他土层,且随着土层深度增加垂直方向上呈波动减少趋势,二者含量具明显的“表聚性”和一定范围内的“相随性”,在剖面上呈现出“倒金字塔”的分布,这与前人的研究结果一致^[12,33-34]。包头黄河湿地植被大多数为一年生草本,植物根系多集中在 0—20 cm,而土壤 SOC、TN 含量显著受植被生物量、微生物呼吸作用以及植被根系分布深度的影响,地表丰富的生物量以及凋落物的分解均为表层土壤提供了充足的碳、氮源^[35];此外,由于雨水淋溶以及水分作用,养分向土壤深层迁移扩散能力随土壤深度增加而下降,从而导致不同类型湿地土壤 SOC、TN 含量随土层加深而逐渐减小。包头黄河湿地 TP 含量范围在 0.60—1.96 g/kg 之间,含量较高,且 TP 含量在不同类型湿地垂直方向上变化不显著,变异系数较低。Walker 等^[36]和 Qu 等^[37]认为 P 的循环属于沉积型循环,土壤中的 P 部分来自沉积岩中 P 的释放,部分来自于枯枝落叶的分解,且主要由土壤母质决定,而成土母质来源于土壤矿物风化,0—60 cm 土壤矿物风化程度差异不大,所以土壤 TP 含量的垂直递减速率要远慢于土壤 SOC 和 TN 含量,导致土壤 TP 具有相对稳定的垂直分布,变异系数较小。

包头黄河湿地常年积水性湿地(如:南海子常年积水区、四道沙河常年积水区)的 SOC、TN、TP 含量均显著高于季节性类型湿地。常年积水性湿地植被生物量和凋落物量显著大于季节性积水湿地,此外,常年积水型湿地植被类型以芦苇、香蒲、酸模、大蓟等多年生草本植物为主,屈凡柱等^[4]认为,芦苇沼泽湿地为高碳输入低碳输出,具有较高生产力,凋落物完全返还于土壤,而芦苇较发达的根系也可以缓冲水分对氮素的冲刷和淋溶等;豆鹏鹏等^[38]认为,比叶面积越大的植物,单位质量凋落物与水的接触面积也就越大,有利于氮和磷的溶出,从而影响土壤的碳氮磷含量;再加上本研究中,常年积水型湿地多处于淹水状态,厌氧环境减少了氮素流失,抑制有机质分解,有利于土壤碳、氮储存。

3.2 包头黄河湿地土壤碳、氮、磷的生态化学计量学特征及其与主要环境因子的关系

包头黄河湿地因为受到黄河水分补给、黄河泥沙汇入、植被、水量盐度差异以及包头重工业的影响,使得其土壤 C、N、P 元素的循环和化学计量研究更为复杂。本研究中 SOC 与 TN 含量呈极显著正相关(表 4),这

说明包头黄河湿地中 C、N 源应该是一致的,主要来源于生物群落。包头黄河湿地 TN 含量和 SOC、TP、N/P 和 C/P 具极显著正相关($P<0.01$),却与 C/N 相关性不显著,这和以往前人的研究大不相同^[3,39-40]。分析认为,本研究中 SOC、TN 在样地土壤垂直层中的变化趋势一样,两组数值相对平行性较高,弱化了 TN 与 C/N 的相关性,但是正是由于这样的不相关,以及 TP 与 SOC、TN、C/N 和 C/P 变现出来的极显著正相关($P<0.01$)性,说明限制包头黄河湿地碳 C、P 有效循环的因素可能是 N 素的缺乏。土壤 pH 与 SOC、TN、TP、C/N、N/P、C/P 呈显著负相关($P<0.05$),pH 值影响土壤微生物活性,间接影响化学元素在土壤中的固定、分解和积累效率。pH 降低,土壤有机质降解速率减缓,积累速率增加,反映了土壤 C 的累积,对应 C/N 比值升高,如果在淹水状态下,微生物呼吸作用将消耗大量的 P,导致土壤 N/P、C/P 比值升高,如四道沙河常年积水区和南海子常年积水区。

Paul 和 Clark^[40]认为 C:N:P 比值是预测土壤养分限制性和有机质分解速率的重要指标。土壤 C/N 是用来评价土壤 N 矿化能力和有机质分解能力是否会受土壤 N 限制的重要指标。C/N<25,表明土壤有机质腐殖化程度高,易于有机质矿化,增加土壤有效氮,且有机质的分解不会受到 N 的限制;反之,土壤微生物对有机质的分解速率将受到 N 含量限制^[17,40]。包头黄河湿地 C/N 均值为 25.39,显著高于全国淋溶土(12.1)、干旱土(12.1)、全国沼泽湿地(18.22)以及其他黄河沿线湿地 C/N 值,N/P 值仅为 0.37,远低于全国淋溶土(5.46)、干旱土(2.6)、沼泽湿地土(13.6)以及其他湿地土壤 N/P 的平均值,可以发现包头黄河湿地土壤处于 N 限制状态。对若尔盖湿地土壤碳、氮、磷化学计量学的研究表明,土壤 C/N、C/P、N/P 均随湿地退化而减小,较高的 C/P 与 N/P<14 揭示氮、磷元素均是影响植物生长的限制性因素,且受氮素限制高于磷素^[41]。曾全超^[42]对陕北地区不同纬度下 5 种典型植被区土壤生态化学计量指标研究发现,高纬度区域的植被更易受 N 素限制,低纬度植被更易缺 P。而大量关于土壤固定过程 C/N 比值研究表明^[32,43],植物是陆地生态系统土壤 C、N 的主要来源,而 P 含量主要取决于土壤母质和岩石风化。本研究结果表明包头黄河不同类型湿地土壤中 C:N:P 均值为 69:25:1,该湿地生态系统的养分变化剧烈且具脆弱性。

4 结论

内蒙古包头黄河湿地土壤 SOC、TN 和 TP 含量平均值分别为 11.20、0.42、0.98 g/kg,与全国湿地、黄河沿线湿地相比,其土壤中 SOC、TP 含量较高,TN 含量较低。SOC 与 TN、TP 含量都呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤 SOC、TN 含量几乎在垂直方向上均表现出波动减小的趋势,二者含量具有明显的“相随性”和“表聚性”。TP 含量变化稳定,除了 2 个常年积水型湿地(四道沙河常年积水区、南海子常年积水区)0—10 cm 土层 TP 含量明显高于其他湿地各土层外,其他湿地的 TP 含量在垂直剖面上差异不大;总体上,包头黄河湿地土壤 TN 含量变异系数较高,SOC、TP 含量变异系数较低。

包头黄河湿地含水量与 SOC、TN、TP、C/N、C/P 含量极显著负相关($P<0.01$),与 N/P 不相关。土壤容重和 TP、C/N 极显著负相关($P<0.01$),与其他不相关。SOC、TP 与 C/N、C/P 极显著正相关,与 N/P 不相关;TN 含量与 C/P、N/P 极显著正相关,与 C/N 不相关。与中国淋溶土、中国干旱土、中国沼泽湿地以及黄河沿线其他湿地相比,包头黄河湿地土壤 C/N 较高,为 25.39,不利于微生物分解作用;C/P、N/P 分别为 9.26、0.37,TP 含量较高,但是 P 有效性却较低,TN 含量及其有效性可能是限制包头黄河湿地土壤碳、氮、磷等元素循环及其生态化学计量特征的关键因子。

参考文献(References):

- [1] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(1): 33-47.
- [2] Liu C, Sun X. A review of ecological stoichiometry: basic knowledge and advances. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.05519-6.
- [3] Tian D, Yan Z B, Niklas K J, Han W X, Kattge J, Reich P B, Luo Y K, Chen Y H, Tang Z Y, Hu H F, Wright I J, Schmid B, Fang J Y.

- Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728-739.
- [4] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 孙景宽, 刘京涛, 宋爱云. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(5): 1731-1738.
- [5] 李兴福, 苏德荣, 吕世海, 布和, 沃强, 韩立亮, 罗琰. 呼伦贝尔草原辉河湿地不同淹水状态的土壤碳氮磷特征比较. *生态学报*, 2018, 38(6): 2204-2212.
- [6] Xu H W, Qu Q, Li P, Guo Z Q, Wulan E, Xue S. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the loess hilly region, China. *Forests*, 2019, 10(1): 27.
- [7] Xue H L, Lan X, Liang H G, Zhang Q. Characteristics and environmental factors of stoichiometric homeostasis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in China. *Sustainability*, 2019, 11(10): 2804.
- [8] Zhang Z S, Lu X G, Song X L, Guo Y, Xue Z S. Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(9): 1309-1315.
- [9] 欧阳林梅, 王纯, 王维奇, 全川. 互花米草与短叶荇菜枯落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征. *生态学报*, 2013, 33(2): 389-394.
- [10] 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.
- [11] 刘文龙, 谢文霞, 赵全升, 朱鲲鹏, 于蓉蓉. 胶州湾芦苇滩涂土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征. *湿地科学*, 2014, 12(3): 362-368.
- [12] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. *地理科学*, 2016, 34(8): 994-1001.
- [13] 郑艳明, 尧波, 吴琴, 胡斌华, 胡启武. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征. *生态学报*, 2013, 33(20): 6488-6496.
- [14] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 杨宝山, 解伏菊. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征. *生态学报*, 2011, 31(16): 4778-4782.
- [15] 张立华, 陈小兵. 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. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 653-658.
- [16] 张友, 徐刚, 高丽, 刘书花, 吕迎春. 黄河三角洲新生湿地土壤碳氮磷分布及其生态化学计量学意义. *地球与环境*, 2016, 44(6): 647-653.
- [17] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴, 王启栋. 黄河三角洲典型潮汐湿地碳、氮、磷生物地球化学特征. *海洋科学*, 2015, 39(1): 84-92.
- [18] 杨文焕, 王铭浩, 李卫平, 樊爱萍, 苗春林, 于玲红. 黄河湿地包头段不同地被类型对土壤有机碳的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(6): 1034-1043.
- [19] 刘建龙. 包头黄河湿地水质评价与需水量研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- [20] 于玲红, 王晓云, 李卫平, 孙岩柏, 高静湉, 樊爱萍, 虞炜. 包头南海湿地冰封期水质特征. *湿地科学*, 2016, 14(6): 810-815.
- [21] 张庆辉. 包头黄河湿地公园建设条件 SWOT 对比分析. *湿地科学与管理*, 2014, 10(1): 14-16.
- [22] 李卫平, 刘建龙, 鲍交琦, 樊爱萍, 王越, 王晓云, 杜方圆, 陈阿辉. 包头黄河湿地生态恢复植物类型的选择. *湿地科学*, 2015, 13(2): 211-216.
- [23] 李卫平, 王非, 杨文焕, 崔亚楠, 樊爱萍, 苗春林. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1977-1984.
- [24] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性. *生态学报*, 2016, 36(14): 4363-4372.
- [25] 卜晓燕, 米文宝, 许浩, 张学艺, 米楠, 宋永永. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2016, 42(1): 107-118.
- [26] 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.
- [27] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 刘晓辉. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1160-1169.
- [28] 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.
- [29] Shen F F, Wu J P, Fan H B, Liu W F, Guo X M, Duan H L, Hu L, Lei X M, Wei X H. Soil N/P and C/P ratio regulate the responses of soil microbial community composition and enzyme activities in a long-term nitrogen loaded Chinese fir forest. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 91-107.
- [30] Julian II P, Gerber S, Bhomia R K, King J, Osborne T Z, Wright A L, Powers M, Dombrowski J. Evaluation of nutrient stoichiometric relationships among ecosystem compartments of a subtropical treatment wetland. Do we have “Redfield wetlands”? *Ecological Processes*, 2019, 8: 20.
- [31] Lu Q Q, Bai J H, Zhang G L, Zhao Q Q, Wu J J. Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2018, 104: 9-17.

- [32] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [33] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 孙万龙. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征. 土壤通报, 2011, 42(6): 1439-1445.
- [34] 张森, 刘福德, 刘庆, 刘玉虹, 李德生. 黄河三角洲不同湿地群落氮磷化学计量特征及其生境适应策略. 生态学杂志, 2015, 34(11): 2983-2989.
- [35] Liu Y, Jiang M, Lu X G, Lou Y J, Liu B. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in Northeast China. *Wetlands*, 2017, 37(1): 153-161.
- [36] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 1976, 15(1): 1-19.
- [37] Qu F Z, Yu J B, Du S Y, Li Y Z, Lv X F, Ning K, Wu H F, Meng L. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River Delta. *Geoderma*, 2014, 235-236: 227-232.
- [38] 豆鹏鹏, 王芳, 马瑜, 庞梅, 米湘成, 马克平, 林敦梅. 叶凋落物碳、氮和磷元素对模拟淋溶的响应. 科学通报, 2018, 63(30): 3114-3123.
- [39] 靖磊, 周延, 吕偲, 赵君茹, 雷光春. 洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(18): 6530-6538.
- [40] Paul E A, Clark F E. *Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego: Academic Press, 1988: c254.
- [41] 叶春, 蒲玉琳, 张世熔, 王贵胤, 王奥博, 王丹, 贾永霞, 徐小逊. 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征. 水土保持学报, 2016, 30(6): 181-187, 192-192.
- [42] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 程曼, 安韶山. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870-879.
- [43] Gusewell S, Bollens U. Composition of plant species mixtures grown at various N:P ratios and levels of nutrient supply. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4(5): 453-466.