

DOI: 10.5846/stxb201712132239

张剑, 宿力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响研究——以敦煌阳关湿地为例. 生态学报, 2019, 39(2): - .

Zhang J, Su L, Wang L P, Bao Y L, Lu J W, Gao X L, Chen T, Cao J J. The effect of vegetation cover on ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus: A case study of the Dunhuang Yangguan wetland. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响研究 ——以敦煌阳关湿地为例

张 剑, 宿 力, 王利平, 包雅兰, 陆静雯, 高雪莉, 陈涛, 曹建军*

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 土壤碳、氮、磷生态化学计量比可以广泛地指示群落的生态学动态过程, 其研究可以为湿地生态系统的恢复与保护提供依据。以敦煌阳关湿地为研究对象, 选取 53 个样地, 分层 (0—20、20—40 cm 和 40—60 cm) 采集土壤样品, 对 3 种植被盖度类型 (高盖度、中盖度和低盖度) 的土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征及其影响因素进行了研究。结果表明: (1) 0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 土层 C/N 变化趋势均为: 高盖度 < 中盖度 < 低盖度, C/P、N/P 变化趋势均为: 低盖度 < 中盖度 < 高盖度。 (2) 高盖度土壤 C/N、C/P 和 N/P 均随土层深度的增加而增大; 中盖度土壤 C/N 随土层深度的增加而增大, C/P、N/P 随土层深度的增加先减小后增大; 低盖度 C/N、C/P 和 N/P 均随土层深度的增加先减小后增大。 (3) 0—60 cm 土层土壤水分与 C/N 显著负相关 ($P < 0.01$), 而与 C/P、N/P 显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤盐分与 C/P、N/P 均显著负相关 ($P < 0.01$), pH 与 C/P、N/P 均显著正相关 ($P < 0.05$), TP 与 C/N 呈显著负相关 ($P < 0.05$), TN 与 C/P、OC 与 N/P 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。由多元线性回归分析可知, 土壤水分是土壤 C/N、C/P 和 N/P 的关键影响因素。

关键词: 敦煌阳关湿地; 植被盖度; 土壤碳、氮、磷; 生态化学计量比; 土壤水分

The effect of vegetation cover on ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus: A case study of the Dunhuang Yangguan wetland

ZHANG Jian, SU Li, WANG Liping, BAO Yalan, LU Jingwen, GAO Xueli, CHEN Tao, CAO Jianjun*

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: This study provided a basis for the restoration and protection of wetland ecosystems, and the ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus widely indicated the ecological dynamic processes of the community. The ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus, and their influencing factors were studied in three cover types using stratified sampling in the Dunhuang Yangguan wetland. The results showed that: (1) The trends of C/N were high < medium < low cover, whereas the trends of C/P and N/P were low < medium < high cover at 0—20, 20—40, and 40—60 cm soil layers. (2) The soil C/N, C/P, and N/P of high cover increased with increasing soil depth, similarly to the C/N of medium cover, and the C/P, N/P decreased initially and then increased with soil depth, as did the C/N, C/P and N/P of low cover. (3) At 0—60 cm soil depths, soil moisture was negatively correlated with C/N ($P < 0.01$), but was positively correlated with C/P and N/P ($P < 0.01$). Soil salinity was negatively correlated with C/P and N/P ($P < 0.01$) at 0—60 cm soil depths. Soil pH was positively correlated with C/P and N/P ($P < 0.05$) at 0—60 cm soil depths. Soil total phosphorus was negatively correlated with C/N ($P < 0.05$), soil total nitrogen was positively correlated

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41461012, 41461109); 甘肃省自然科学基金项目 (1208RJAZ114)

收稿日期: 2017-12-13; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caojj@nwnu.edu.cn

with C/P ($P < 0.01$), and soil organic carbon was positively correlated with N/P ($P < 0.01$) at 0—60 cm soil depths. Multiple linear regressions showed that soil moisture was the key factor affecting ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus.

Key Words: Dunhuang Yangguan wetland; vegetation cover; soil carbon, nitrogen, and phosphorus; ecological stoichiometric ratios; soil moisture

生态化学计量学是研究生态系统能量平衡和多重化学元素(主要是碳、氮、磷)平衡的科学,以及元素平衡影响生态交互作用的一种理论^[1]。湿地生态系统是介于陆地与水体之间的独特生态系统,其土壤是营养元素的主要截留者和储存库^[2],对营养元素的迁移和转化有重要影响。土壤有机碳含量变化对湿地的生态平衡及气候变化有重要意义^[3],氮磷是湿地植物生长必须的矿物质营养元素和限制性养分^[1],对湿地生态系统的生产力和生态净化功能等有重要影响;湿地土壤的碳、氮、磷生态化学计量比是有机质含量和质量的重要指标,能反映有机质分解速率以及养分矿化和固持间的平衡关系^[4]。因此,研究湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征,对认识湿地生态系统空间格局变化规律和碳、氮、磷元素的循环与平衡机制,揭示养分的可获得性和预测未来的变化趋势都具有重要意义^[5]。

国外关于生态化学计量学的研究起步较早,最初由海洋生态学家和地球化学家对海洋生态系统进行了研究^[6]。随后,研究人员对其他水生和陆生生态系统的生态化学计量比开展了大量研究,并取得诸多成果。近年来,生态化学计量学的相关研究越来越受到国内学者的关注,内容涉及森林生态系统、草地生态系统以及湿地生态系统。对于湿地生态系统而言,肖焱等研究了吉林东部 4 种沼泽湿地类型的土壤,得出含水量是 C/P 和 N/P 的关键影响因子的结论^[7];张友等研究了黄河三角洲不同植被下的土壤,结果表明氮为限制植物生长的重要营养元素^[8];王维奇等研究了闽江河口不同河段湿地土壤,表明土壤水分和粉粒含量是 C/N、C/P 和 N/P 的关键影响因子^[9];青焱等对若尔盖高寒湿地土壤的研究表明,有机碳与氮、磷显著相关并制约着碳、氮的平衡,C/N 通过控制 C、N 的矿化作用来影响 C/P 和 N/P^[10]。从研究区域来看,多集中在河口湿地^[2,8-9,11-12]、滨海湿地^[13-14]、三江平原湿地^[7]以及高寒湿地^[10],相比而言对于干旱区湿地的生态化学计量学研究较为缺乏。

干旱区湿地是江河源区重要的水源涵养地,是荒漠生态系统中的宝贵绿洲和物种多样性中心^[15]。植被作为干旱区湿地的重要组成要素,其覆盖程度能反映地表植被群落的生长态势,是描述湿地生态系统的重要基础数据,对于干旱区湿地生态系统环境变化有着重要指示作用^[16],而土壤养分是湿地植被生长的主要限制因子^[17],土壤碳、氮、磷生态化学计量比反映着植物与生态系统的养分供需平衡^[18]。因此,本文以干旱区敦煌阳关典型湿地为研究对象,通过分析不同植被盖度下土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征及其影响因素,探究植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响状况,摸清区域不同植被盖度下的土壤质量和生产力状况,明确影响生态化学计量比空间分布的主导因素,为干旱区湿地的合理利用及湿地生态系统的保护和恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

敦煌阳关湿地隶属于甘肃省敦煌阳关国家级自然保护区(图 1),与干旱区其他湿地相比,在地理位置、气候条件、水源供给以及植被构成等方面具有代表性。湿地介于 96°06'—94°09'E,39°51'—39°55'N 之间,面积 11.6 km²,海拔高度介于 1150—1500 m 之间。西北是黄水坝水库,东面、南面及西南边缘邻近沙漠,降水稀少,气候干燥,冬季严寒,夏季酷热,年平均气温 9.3℃,降水量 39.9 mm,蒸发量 2486 mm,属典型的大陆性干旱气候。多处溢出量大而且稳定的泉眼,为湿地提供了主要的水源供给。研究区土壤以草甸土、沼泽土和盐

土为主,部分区域分布有风沙土和棕漠土。主要植被类型为莎草型湿地植被型,芦苇(*Phragmites australis*)为优势种,其中高盖度植物伴生种有赖草(*Leymus secalinus*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、水麦冬(*Triglochin palustre*)、盐角草(*Salicornia europaea*)、鸦葱(*Scorzonera austriaca*)、海乳草(*Glaux maritima*)等,中盖度植被类型有赖草、黑果枸杞、鸦葱等,低盖度植被类型有骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、黑果枸杞等^[19]。

1.2 样地设置与采样

2015 年 8 月对敦煌阳关渥洼池湿地植被-土壤进行了全面综合调查,沿湿地东南侧从湿地到荒漠方向设置 5 条样带,样带间距约 500 m,每条样带上每隔 200 m 布设一个大小为 30 m×30 m 的样地,共计 53 个样地,每个样地内随机布设 5 个 1 m×1 m 的样方^[19]。记录样地的经纬度和海拔后,对样地植物的群落组成及其特征进行详细调查。参照干旱区湿地分层采样的方法^[20],用土钻采集 0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 土层的土壤,本次共采取到 2385 个土壤样品。用空间聚类分析将植被盖度分为三类,对应的将样地划分成高盖度(77.6%—100%,平均 85.35%),中盖度(53.6%—74.6%,平均 64.98%)和低盖度(19.60%—51.8%,平均 40.48%)3 种类型^[19],其中高盖度样地 20 个,中盖度样地 19 个,低盖度样地 14 个。

1.3 样品测定

土样去除杂质后放置在通风处阴干,研磨后过筛,采用常规方法测定其理化性质^[21]。土壤水分采用烘干法测定,容重采用环刀法测定,盐分采用质量法测定,pH 用酸度计测定;土壤有机碳(Organic Carbon)含量采用重铬酸钾-硫酸外加加热法测定,全氮(Total Nitrogen)含量采用开氏法测定,全磷(Total Phosphorus)含量采用钼锑抗比色法测定。研究区不同盖度土壤理化性质见表 1。

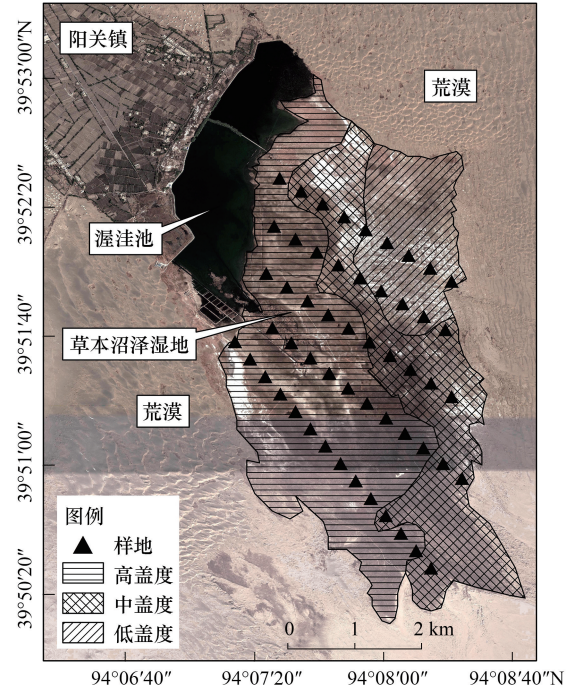


图 1 研究区地理位置及样地分布图

Fig.1 Geographical location in the study area and distribution of the sampling plots

表 1 研究区土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the study area

土层 Soil layer /cm	植被盖度 Vegetation Cover	水分 Moisture/ %	盐分 Salinity/ (g/kg)	pH	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)
0—20	高盖度	28.73±1.50a	2.79±0.50c	8.16±0.06a	1.24±0.02a	9.75±0.48a	0.46±0.03a	0.50±0.01a
	中盖度	22.67±1.61b	9.13±1.73b	7.99±0.10ab	1.17±0.03a	8.93±0.43a	0.40±0.02ab	0.48±0.01a
	低盖度	10.86±1.34c	19.65±2.03a	7.91±0.07b	1.15±0.04a	8.33±0.58a	0.36±0.03b	0.47±0.01a
20—40	高盖度	32.90±1.60a	1.31±0.18c	8.25±0.07a	1.34±0.03a	10.35±0.67a	0.48±0.03a	0.51±0.01a
	中盖度	26.83±1.96b	3.77±0.79b	8.11±0.10ab	1.32±0.02a	8.79±0.54a	0.38±0.02b	0.50±0.01a
	低盖度	13.18±1.75c	12.64±1.61a	7.96±0.05b	1.29±0.04a	6.45±0.46b	0.29±0.02b	0.48±0.01a
40—60	高盖度	37.46±2.04a	1.11±0.17c	8.25±0.06a	1.29±0.02b	11.82±0.94a	0.52±0.04a	0.50±0.01a
	中盖度	32.92±1.98b	3.11±0.63b	8.12±0.10 ab	1.32±0.02a	10.36±0.51a	0.42±0.03b	0.48±0.01a
	低盖度	17.95±2.34c	8.07±0.99a	8.00±0.04b	1.40±0.02a	7.37±0.60b	0.32±0.03c	0.49±0.01a
0—60	高盖度	33.03±1.61a	1.74±0.25c	8.22±0.06a	1.24±0.02a	10.64±0.63a	0.49±0.03a	0.50±0.01a
	中盖度	27.47±1.79b	5.33±1.00b	8.07±0.10 ab	1.17±0.03a	9.36±0.37a	0.40±0.02b	0.49±0.01ab
	低盖度	14.00±1.75c	13.45±1.41a	7.96±0.05b	1.15±0.04a	7.38±0.47b	0.32±0.02b	0.48±0.01b

数据为平均值±标准误差,0—60 cm 土层数据为 0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 土层算术平均值,不同字母代表同一土层不同盖度间差异显著($P < 0.05$)

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据输入,利用 SPSS 21.0 进行双因素方差分析、单因素方差分析 (one-way ANOVA, LSD 法进行显著性检验)、相关性分析 (Pearson 系数法) 以及多元线性回归分析,利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比特征

双因素方差分析结果表明:植被盖度和土层对土壤 C、N、P 生态化学计量比的交互作用不显著 ($P>0.05$),因此从盖度和土层两个因素分别对 C/N、C/P 和 N/P 进行单因素方差分析。

0—60 cm 土层 C/N 有较大的空间变异性,表现为高盖度<中盖度<低盖度,高、中、低 3 种盖度差异均不显著 ($P>0.05$);0—60 cm 土层 C/P 变异性为中盖度<低盖度<高盖度,且高、中盖度的变异系数存在显著差异 ($P<0.05$);0—60 cm 土层 N/P 变异性为中盖度<低盖度<高盖度,且高盖度的变异系数与中、低盖度的存在显著差异 ($P<0.05$) (表 2)。

表 2 湿地不同植被盖度 C/N、C/P 和 N/P 垂直分布特征

Table 2 Vertical distribution characteristics of C/N, C/P and N/P at the different vegetation cover

植被盖度 Vegetation cover	土层 Soil Layer/cm	碳氮比 C/N			碳磷比 C/P			氮磷比 N/P		
		均值	变化范围	变异系数/%	均值	变化范围	变异系数/%	均值	变化范围	变异系数/%
高盖度 ($n=20$)	0—20	22.26±5.20a	12.93—35.70	23.36	19.45±4.91c	9.83—25.54	21.57	0.92±0.28a	0.42—1.46	30.76
	20—40	22.62±4.98a	14.93—30.40	22.03	20.31±5.18ab	9.86—31.81	25.52	0.94±0.31a	0.42—1.54	33.44
	40—60	23.33±6.41a	14.52—42.69	27.49	23.55±7.28a	14.83—46.07	30.91	1.05±0.32a	0.53—1.80	30.66
	0—60	22.73±5.00a	15.20—35.62	21.99	21.08±4.81a	11.59—33.37	22.84	0.97±0.29a	0.48—1.48	29.92
中盖度 ($n=19$)	0—20	22.92±5.46a	12.59—31.90	23.81	18.54±4.18a	10.24—26.97	22.53	0.82±0.13a	0.50—1.06	16.00
	20—40	24.60±8.41a	14.60—52.93	34.18	17.60±4.42a	10.39—26.56	25.11	0.75±0.19a	0.36—1.16	25.77
	40—60	26.15±8.07a	14.25—45.50	30.86	21.69±5.02b	15.71—34.60	23.15	0.88±0.25a	0.52—1.40	28.57
	0—60	24.27±5.85a	14.79—40.63	24.11	19.23±3.33a	13.66—27.26	17.31	0.82±0.15b	0.53—1.09	18.80
低盖度 ($n=14$)	0—20	25.99±11.31a	13.67—59.47	43.52	17.87±4.59a	11.43—24.24	25.71	0.76±0.23a	0.22—1.13	30.72
	20—40	25.72±14.94a	13.29—73.71	58.11	13.33±2.95b	7.56—18.86	22.11	0.59±0.16b	0.17—0.82	27.57
	40—60	27.43±18.51a	15.21—88.96	67.46	15.26±4.63ab	8.79—23.13	30.34	0.65±0.21ab	0.15—0.95	32.46
	0—60	25.94±13.92a	14.24—71.42	53.65	15.44±3.39b	9.32—21.07	21.98	0.66±0.17b	0.18—0.91	25.62

数据为平均值±标准误差,0—20、20—40、40—60 cm 土层不同字母表示同一盖度下不同土层差异显著 ($P<0.05$),0—60 cm 土层不同字母表示不同盖度间差异显著 ($P<0.05$)

0—20、20—40、40—60 cm 土层中 C/N 的变化趋势为:高盖度<中盖度<低盖度,但其差异均不显著 ($P>0.05$)。高、中盖度 C/N 随土层深度的增加而增大,低盖度 C/N 随土层深度的增加而减小;0—20、20—40、40—60 cm 土层中 C/P 的变化趋势为:低盖度<中盖度<高盖度,其中 0—20 cm 与 20—40 cm 土层不同盖度间呈显著差异 ($P<0.05$)。高盖度 C/P 随土层深度的增加而增大,中、低盖度 C/P 随土层深度的增加呈先减后增趋势;0—20、20—40、40—60 cm 土层中 N/P 的变化趋势为:低盖度<中盖度<高盖度,不同盖度间的差异均显著 ($P<0.05$)。高盖度 N/P 随土层深度的增加而增大,中盖度和低盖度 N/P 随土层深度的增加呈先减后增趋势 (图 2)。

2.2 土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响因素

高盖度 0—20 cm 土层土壤水分与 C/N 呈显著负相关 ($P<0.05$),各土层水分与 C/P 呈极显著正相关 ($P<0.01$),与 N/P 呈极显著正相关 ($P<0.01$)。低盖度 20—40、0—60 cm 土层盐分与 C/N 呈显著负相关 ($P<$

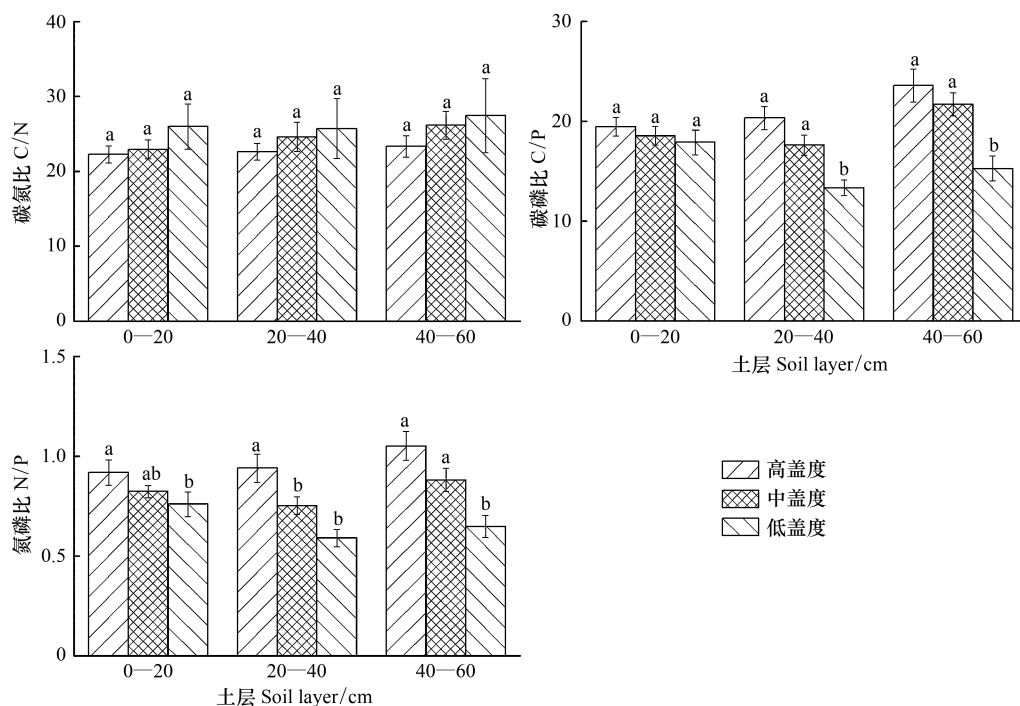


图2 同一土层不同植被盖度土壤 C/N、C/P 和 N/P 分布趋势

Fig.2 Variation tendency of soil C/N, C/P and N/P with same soil depth at the different vegetation cover

不同字母代表同一土层不同植被盖度差异显著 ($P < 0.05$)

0.05), 中盖度 0—20 cm 土层盐分与 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 高盖度 0—60 cm 土层盐分与 N/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。低盖度 20—40、40—60 cm 土层 pH 与 C/N 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 中盖度 20—40 cm 土层 pH 与 C/P 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。高盖度 0—20、20—40 cm 土层容重与 C/N 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 高盖度 40—60 cm 土层容重与 C/P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 高盖度 20—40、40—60 cm 土层容重与 N/P 呈极显著负相关 ($P < 0.01$) (表 3)。

低盖度 0—60 cm 土层 TP 与 C/N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 其中 0—20、20—40 cm 土层呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 40—60 cm 土层呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。高盖度 0—60 cm 土层 TN 与 C/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中高盖度各土层均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。高、低盖度 0—60 cm 土层 OC 与 N/P 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中 0—20 土层呈极显著正负相关 ($P < 0.01$), 20—40、40—60 cm 土层呈显著负相关 ($P < 0.05$) (表 3)。研究区土壤 0—60 cm 土层水分与 C/N 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 C/P、N/P 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 0—60 cm 土层盐分与 C/P、N/P 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 其中 20—40、40—60 cm 土层均呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 0—60 cm 土层 pH 与 C/P、N/P 均呈显著正相关 ($P < 0.05$); 0—20、40—60 cm 土层容重与 C/P 和 N/P 均呈极显著负相关 ($P < 0.01$) (表 4)。

研究区土壤 0—60 cm 土层 TP 与 C/N 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 0—20 cm 土层呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 0—20、20—40、40—60、0—60 cm 土层 TN 与 C/P、OC 与 N/P 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 4)。

导致 C/N、C/P、N/P 差异的影响因子有所不同: C/N 与水分、盐分和 TP 有显著的线性拟合, 而与 pH 和容重拟合程度低; C/P 与水分、TN 和盐分有显著的线性拟合, 而与 pH 和容重拟合程度低; N/P 与水分、容重和 OC 有较高的线性拟合, 而与盐分和 pH 拟合程度低。其中水分与 C/N、C/P、N/P 线性拟合程度最高 (表 5)。因此, 土壤水分是影响 C/N、C/P、N/P 的关键因子。表 6 为研究区土壤 0—60 cm C/N、C/P、N/P 与土壤水分的线性拟合关系。

表 3 不同盖度土壤 C/N、C/P、N/P 与影响因子的相关关系

Table 3 The relationship between C/N, C/P, N/P and impact factor at different vegetation cover																		
植被盖度 Vegetation cover	土层 Soil Layer/cm	碳氮比 C/N						碳磷比 C/P						氮磷比 N/P				
		水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	TP/ (g/kg)	水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	TN/ (g/kg)	水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	OC/ (g/kg)		
高盖度 (n=20)	0—20	-0.517 *	0.178	0.011	0.479 *	0.07	0.570 **	-0.342	0.153	-0.056	0.621 **	0.866 **	-0.439	0.046	-0.434	0.600 **		
	20—40	-0.391	0.105	-0.221	0.467 *	0.26	0.748 **	-0.400	0.025	-0.339	0.736 **	0.837 **	-0.415	0.168	-0.567 **	0.548 *		
	40—60	-0.128	0.281	-0.183	0.066	0.433	0.763 **	-0.142	-0.252	-0.679 **	0.776 **	0.767 **	-0.384	-0.060	-0.681 **	0.558 *		
	0—60	-0.404	0.261	-0.182	0.269	0.348	0.743 **	-0.391	-0.069	-0.252	0.767 **	0.858 **	-0.533 *	0.062	-0.396	0.588 **		
中盖度 (n=19)	0—20	-0.427	0.278	0.032	-0.090	-0.341	-0.662 **	-0.572 *	-0.022	-0.583 **	0.106	-0.230	0.336	-0.058	-0.612 **	0.269		
	20—40	0.144	-0.069	0.361	-0.176	-0.134	0.628 **	-0.371	0.558 *	-0.434	0.527 *	0.479 *	-0.348	0.215	-0.192	0.541 *		
	40—60	-0.323	0.449	0.119	0.287	-0.04	0.321	-0.066	0.354	-0.340	0.295	0.590 **	-0.500 *	0.239	-0.590 **	0.325		
	0—60	-0.198	0.324	0.173	-0.148	-0.178	0.158	-0.003	0.405	-0.101	0.197	0.448	-0.432	0.215	-0.101	0.292		
低盖度 (n=14)	0—20	-0.306	-0.358	-0.168	0.425	-0.764 **	0.583 *	0.370	0.431	-0.713 **	0.416	0.482	0.244	0.423	-0.699 **	0.622 *		
	20—40	-0.307	-0.570 *	-0.603 *	-0.238	-0.687 **	0.255	-0.086	0.355	0.148	0.400	0.205	0.417	0.749 **	0.068	0.524		
	40—60	-0.486	-0.522	-0.533 *	0.371	-0.636 *	0.485	-0.016	0.039	-0.321	0.465	0.700 **	0.244	0.465	-0.490	0.571 *		
	0—60	-0.429	-0.556 *	-0.468	0.456	-0.733 **	0.525	0.094	0.369	-0.691 **	0.383	0.645 *	0.331	0.698 **	-0.730 **	0.555 *		

n=53, * 均值差的显著性水平为0.05, ** 均值差的显著性水平为0.01

表 4 不同土层间土壤 C/N、C/P、N/P 与影响因子的相关关系

Table 4 The relationship between C/N, C/P, N/P and impact factor at different soil layers																	
土层 Soil layer/cm	碳氮比 C/N						碳磷比 C/P						氮磷比 N/P				
	水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	TP/ (g/kg)	水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	TN/ (g/kg)	水分/%	盐分/ (g/kg)	pH	容重/ (g/cm ³)	OC/ (g/kg)		
0—20	-0.390 **	0.107	-0.084	0.226	-0.444 **	0.170	0.107	0.162	-0.400 **	0.451 **	0.504 **	-0.142	0.161	-0.410 **	0.563 **		
20—40	-0.178	-0.145	-0.089	-0.071	-0.258	0.744 **	-0.512 **	0.424 **	-0.136	0.727 **	0.702 **	-0.384 **	0.365 **	-0.206	0.662 **		
40—60	-0.317 *	-0.016	-0.150	0.251	-0.233	0.699 **	-0.403 **	0.177	-0.603 **	0.692 **	0.774 **	-0.472 **	0.260	-0.695 **	0.626 **		
0—60	-0.390 **	0.107	-0.084	0.226	-0.318 *	0.659 **	-0.405 **	0.302 *	-0.208	0.675 **	0.745 **	-0.434 **	0.306 *	-0.177	0.646 **		

n=53, * 均值差的显著性水平为0.05, ** 均值差的显著性水平为0.01

表 5 研究区土壤 C/N、C/P、N/P 与影响因素的多元线性回归分析

Table 5 Multiple regression of soil C/N, C/P, N/P and influencing factors in the study area

因变量 Dependent variable	决定系数 Coefficient of determination	因素 Factor	非标准化系数 Unstandardized coefficients	标准系数 Standardized coefficients	T 检验 T Test	显著性差异 Significant difference
C/N	0.190	(常量)	69.18		2.98	0.00340
		TP	-53.23	-0.24	-3.16	0.00191
		水分	-0.37	-0.44	-3.95	0.00012
		盐度	-0.53	-0.39	-3.41	0.00082
		pH	-0.64	-0.02	-0.27	0.78408
		容重	-0.45	-0.01	-0.08	0.93907
C/P	0.496	(常量)	10.85		1.04	0.29933
		TN	13.08	0.33	3.42	0.00080
		水分	0.25	0.50	4.26	0.00004
		盐度	0.16	0.19	2.16	0.03226
		pH	0.08	0.00	0.07	0.94223
		容重	-4.15	-0.10	-1.36	0.17668
N/P	0.606	(常量)	1.26		2.89	0.00443
		OC	0.02	0.18	2.57	0.01098
		水分	0.02	0.67	6.94	0.00000
		盐度	0.01	0.14	1.71	0.08952
		pH	-0.04	-0.05	-0.87	0.38571
		容重	-0.56	-0.27	-4.48	0.00001

表 6 研究区土壤 C/N、C/P、N/P 与土壤水分的关系

Table 6 Relationship between soil C/N, C/P, N/P and soil moisture in the study area

生态化学计量比 Ecological stoichiometric ratios	线性回归 Linear regression	决定系数 Coefficient of determination	显著性差异 Significant difference
C/N	$y = -0.204x + 20.652$	0.590	$P < 0.01$
C/P	$y = 0.294x + 11.325$	0.352	$P < 0.01$
N/P	$y = 0.016x + 0.414$	0.439	$P < 0.01$

3 讨论

3.1 湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量比分布特征

研究区土壤 C/N 平均值大小相比高于闽江河口湿地^[2,9]、胶州湾滩涂湿地^[12]、若尔盖高寒湿地^[10], 主要是因为研究区湿地干旱少雨的气候条件和高盐碱化的土壤环境, 抑制了土壤微生物群落活性, 减缓了土壤有机物矿化分解, 导致土壤 C/N 的差异^[4], 另外土壤荒漠化也会导致土壤 C/N 的增大^[22], 芦苇庞大的地下根系导致 C 输入的增大也是可能原因之一^[23]。研究区高、中、低 3 种盖度土壤 0—60 cm 土层的 C/N 差异不显著, 说明 3 种盖度土壤 C/N 比较稳定, 因为 C、N 作为植物结构性成分, 在植物体内的积累和消耗过程中具有相对固定的比值^[24], 对环境变化的响应具有一致性, 这与曾全超等得出的森林、森林草原、草原 3 种植被带下土壤 C/N 稳定的结果一致^[25]。另外, C/N 大小与有机质在矿化过程中所释放出有效 N 的多少成反比, C/N 值越大, 释放出有效 N 量就越少^[1]。因此, 在 P 含量相近的情况下, N 含量较低的土壤更不利于 N 的积累。

研究区土壤 C/P 和 N/P 平均值均低于闽江河口湿地^[2,9]、若尔盖高寒湿地^[10]、胶州湾滩涂湿地^[12], 说明土壤磷素矿化能力相对较低^[25]。土壤 P 的来源主要是岩石的风化以及凋落物的归还, 其中土壤母质是影响其含量的主要因素^[26]。高盖度 0—20、20—40、40—60 cm 土层 P 含量略均高于中低盖度, 不同盖度间差异均不显著, 说明土壤 C/P 和 N/P 的变化主要取决于 OC、TN 含量, 植被盖度对 OC、TN 的影响高于 TP。C/P 是

衡量土壤 P 有效性的指标之一^[27],研究区土壤 C/P 随盖度的降低而降低,因此土壤磷的有效性随植被盖度的降低而降低。虽然植物吸收的是土壤中的有效氮和有效磷,但土壤 N/P 可以反映养分库容量和氮磷的矿化速率,从而间接预测群落养分的供给性水平和限制水平^[8,25,28],研究区 N/P 均值为 0.83,远低于全国 N/P 平均值 8^[29],与黄河三角洲新生湿地^[8]的 0.77 接近,因此 N 也是本研究区的限制性营养元素。研究区土壤生态化学计量比与全国湿地的比较如表 7 所示。

表 7 敦煌阳关湿地土壤生态化学计量比与其他湿地比较

Table 7 Comparison of ecological stoichiometric ratios of soils in other wetlands and Dunhuang Yanguan wetland

湿地 Wetland	地理位置 Geographical position	湿地类型 Wetland type	土层 Soil layer/cm	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
闽江河口湿地 ^[9]	福建省东部	沼泽湿地	0—50	11.8	27.7	2.3
大沽河口湿地 ^[12]	青岛市胶州湾	河流湿地	0—60	17.1	182.6	11.6
黄河三角洲新生湿地 ^[8]	山东省东营市	河流湿地	0—50	8.7	6.6	0.8
黄河口滨岸潮滩湿地 ^[11]	山东省东营市	河流湿地	0—10	31.9	—	—
			10—20	37.1	—	—
黄河三角洲 ^[13]	山东省东营市	河流湿地	0—10	—	—	0.8
			40—50	—	—	0.3
东北湿地 ^[7]	吉林省敦化市	沼泽湿地	0—40	12.5	126.5	9.7
延安湿地 ^[25]	陕西省延安市	河流湿地	0—10	10.8	24.2	2.1
			10—20	10.1	14.8	1.4
宁夏平原湿地 ^[5]	宁夏回族自治区	河流湿地	0—40	12.4	18.3	1.5
		湖泊湿地	0—40	8.2	17.9	2.2
		沼泽湿地	0—40	10.3	23.5	2.3
若尔盖高寒湿地 ^[10]	四川省北部	沼泽湿地	0—40	11.1	62.3	5.9
敦煌阳关湿地(本研究)	甘肃省敦煌市	沼泽湿地	0—60	24.1	18.9	0.8
全国土壤 ^[29]			0—10	14.4	136.0	9.3
			10—50	12.3	74.0	6.1
			0—50	13.4	105.0	7.7

表中“—”表示原文未涉及该指标

研究区高、中盖度 C/N 随土层深度的增加而增大,这与多数研究结果相反^[1],主要是因为研究区土壤水分的深层分布导致与芦苇根系集中分布在 40—60 cm 处,芦苇根系分泌物和微生物的活动增加了土壤有机质的含量^[30]。土壤微生物分解有机质的适宜 C/N 比值是 25:1,当 C/N<25 时,微生物对 C 的需求量相对较大^[31]。因此,高、中盖度土壤对 C 的需求量由表层向深层递减,低盖度 40—60 cm 土层土壤对 N 的需求较大。研究区不同土层和不同盖度的土壤 C/P、N/P 均有一致的变化趋势,表明土壤中 OC、TN 元素在生物和非生物环境中有一致的变化特征^[32],这是因为 C、N 都是主要来自于有机物,OC 的保持量很大程度上决定了 TN 含量水平^[33]。

3.2 影响土壤生态化学计量比的因素

土壤水分和植被群落的耦合关系是生态水文和土壤水分的核心,尤其在干旱区,土壤水分对植被生长的制约最为突出^[34]。土壤水分能影响土壤好氧厌氧状况和生物量的空间分布,从而影响植物根系的分布、微生物的活动以及凋落物的归还,间接地影响土壤 C、N 循环过程^[19]。水分对 OC 矿化动态有较大的影响,特别是土壤表层^[35],有研究表明,较高的土壤水分能减缓泥炭、草木残体和凋落物的氧化分解,因此可以提高 C、N 在生态系统中的循环效率,有效地防止湿地退化^[36]。有研究表明,湿地土壤 P 的空间差异性较小,受水分的影响程度远低于 C、N^[10]。研究区土壤水分呈表层向深层递增的趋势,这与大多数湿地相反^[4],因为深层地下水是研究区土壤水分补给的主要方式,而且气候干旱导致土壤表层水分蒸发强烈。

土壤盐分也是影响干旱区湿地土壤 C、N、P 生态化学计量比的主要指标。较高的盐分会抑制土壤 C、N

的积累。一方面盐分能改变土壤的理化性质,影响土壤对水分和养分的保持能力,于君宝等研究表明盐分高的土壤结构较差^[37];另一方面,盐分能改变土壤微生物的生存条件,影响其种群数量和生物活性^[19],进而影响土壤 C、N、P 的分解和释放速率,以及通过 N、P 的矿化作用影响 N、P 的周转^[8]。另外,研究区高盐分土壤植被盖度较低,说明盐分可以通过影响湿地植物的生长状况而间接影响土壤 C、N、P 的循环和平衡^[12]。

土壤 pH 是影响土壤肥力、植物生长和微生物活动的重要因素之一。能够直接影响 C、N、P 的存在形态和转化方式,同时对土壤养分元素的有效性产生一定的影响,比如中性土壤 P 的有效性较高^[8]。pH 还能影响微生物的活性,pH>8.5 或 pH<5.5 都会抑制微生物对有机质的氧化、硝化、氨化、固氮、硫化等过程,从而影响对土壤 C、N 的固定和累积能力^[38]。研究区土壤 pH 变化范围为 7.96—8.25,与 C/N、C/P、N/P 的相关性不显著,说明研究区土壤 pH 的波动对微生物活动影响不大。

土壤容重是反映土壤质量和生产力水平的重要指标^[39]。容重与土壤的水、热状况密切相关,对湿地土壤而言,不仅能反映出湿地土壤的持水性能、蓄水性能,还能反映出土壤的结构状况和有机质含量高低^[40]。有机质通过对土壤孔隙度、持水性和导水性的影响,可以间接地影响土壤容重,有研究表明,土壤有机质可以解释土壤容重 81% 的变异^[41]。研究区土壤容重垂直差异不显著,与 C/N、C/P、N/P 的相关性较差,还需进一步深入研究。

土壤 C、N、P 的空间异质性导致土壤 C/N、C/P 和 N/P 也表现出较大的空间变化^[7],研究区 3 种盖度土壤 C、N、P 的变化趋势均为 C>P>N,N 含量平均值 0.41 g/kg 显著低于全国土壤平均值 1.61 g/kg。较大的 C/N 导致有机物矿化过程中释放的有效氮含量减小,进一步影响植被生长状况和土壤质量^[24]。有研究表明,土壤 OC 的增加会导致土壤 N、P 有效性的增加,其中 C、N 之间的相互作用是建立在微生物活动的基础上的^[32]。研究区 0—20、20—40、40—60 cm 土层 TN 与 C/P、OC 与 N/P 均呈极显著正相关,因为岩石风化过程漫长,湿地土壤 P 积累比 C、N 缓慢,导致整个空间 P 的分布比较均匀^[7],而土壤 C、N 又存在极显著正相关关系,含量变化趋势基本一致的缘故^[33],这与若尔盖高寒区土壤、黄土高原延河流域土壤的研究结果一致^[10,25]。

4 结论

研究区植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比有显著影响,同一土层中 C/P 和 N/P 变化趋势一致,表现为低盖度<中盖度<高盖度,C/N 则表现为相反的趋势。高、中盖度 C/N 随土层深度的增加而增大,低盖度则随土层深度的增加而减小;3 种盖度 C/P 和 N/P 垂直分布总体一致,由表层到深层有递增的趋势。

水分为研究区土壤 C/N、C/P、N/P 的关键影响因子。因此,针对目前湿地的土壤质量状况,需采取合理的用水和节水措施,杜绝绿洲农区无序开采地下水资源,大力推广节水工程,保障湿地生态用水,维护区域生态安全。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 胡敏杰,邹芳芳,邹双全. 盐度梯度下闽江口短叶荇菜湿地土壤生态化学计量学特征. 城市环境与城市生态, 2014, 27(4): 17-21.
- [3] 刘刚,沈守云,闫文德,田大伦,伍倩,梁小翠. 洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征. 生态学报, 2011, 31(24): 7625-7631.
- [4] 冯德枫,包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
- [5] 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.
- [6] Schindler D W. Balancing planets and molecules. Nature, 2003, 423(6937): 225-226.
- [7] 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, 2014, 34(8): 994-1001.
- [8] 张友,徐刚,高丽,刘树花,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.
- [9] 王维奇,王纯,曾从盛,仝川. 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.

- [10] 青烨, 孙飞达, 李勇, 陈文业, 李昕. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析. 草业学报, 2015, 24(3): 38-47.
- [11] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口滨岸潮滩湿地土壤碳、氮的空间分异特征. 地理科学, 2012, 32(12): 1521-1529.
- [12] 刘文龙, 谢文霞, 赵全升, 朱鲲鹏, 于蓉蓉. 胶州湾芦苇潮滩土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征. 湿地科学, 2014, 12(3): 362-368.
- [13] 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.
- [14] 潘良浩, 韦江玲, 陈元松, 曾聪, 范航清. 茅尾海荦芒及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态. 湿地科学, 2012, 10(4): 467-473.
- [15] 侯倩倩, 屈建军, 王国华, 肖建华, 庞营军. 中国干旱半干旱地区湿地研究进展. 干旱区研究, 2015, 32(2): 213-220.
- [16] 甘春英, 王兮之, 李保生, 梁钊雄, 李志文, 温小浩. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析. 地理科学, 2011, 31(8): 1019-1024.
- [17] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Diaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 2003, 51(4): 335-380.
- [18] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 邱永志, 李生字, 高培, 钟显彬, 闫健, 王桂芬. 不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征. 干旱区地理, 2014, 37(5): 996-1004.
- [19] 张剑, 王利平, 谢建平, 赵庭伟, 曹建军. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2455-2464.
- [20] 王勇辉, 焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征. 生态学报, 2016, 36(18): 5893-5901.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 刘颖茹, 杨持, 朱志梅, 刘美玲. 我国北方草原沙漠化过程中土壤碳、氮变化规律研究. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1604-1606.
- [23] Moser G, Leuschner C, Hertel D, Graefe S, Soethe N, Iost S. Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): the role of the belowground compartment. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2211-2226.
- [24] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [25] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [26] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 945-952.
- [27] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 张宪洲, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统植被磷含量分布特征及其影响因素. 草地学报, 2014, 22(1): 27-38.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, 26(1): 9-16.
- [31] 胡斌. 黄土高原旱作农田地膜覆盖下土壤磷素转化、有机质矿化及土壤生态化学计量学特征. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [32] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 毛培利, 吴春发, 管博. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [33] 白军红, 邓伟, 张玉霞. 莫莫格湿地土壤氮磷空间分布规律研究. 水土保持学报, 2001, 15(4): 79-81.
- [34] 徐志尧, 张钦弟, 杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 145-151.
- [35] 吴建国, 艾丽, 朱高, 田自强, 茆伟. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素. 草地学报, 2007, 15(1): 20-28.
- [36] 王元峰, 王辉, 马维伟, 冯宜明, 李俊臻. 尕斯库勒湖 4 种湿地类型土壤水分特性研究. 干旱区研究, 2012, 29(4): 598-603.
- [37] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 谢文军, 毛培利, 吴春发, 董洪芳, 牟晓杰, 栗云召, 管博, 单凯. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征. 环境科学学报, 2010, 30(4): 855-861.
- [38] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [39] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [40] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 王小利, 吴金水. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征. 环境科学, 2005, 26(3): 56-60.
- [41] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. Biogeochemistry, 2007, 84(2): 131-141.