青海湖流域河流生态系统评价指标间的相关性

李少华[1]，王学全[1]，高 琪[2]，兰 岚[1]，杨占武[3]

(1. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所，北京 100091；
2. 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院，内蒙古 呼和浩特 010019；3. 青海省林业科学研究所，青海 西宁 810016)

摘 要：[目的] 研究河岸草甸生态特征、河岸土壤性状及河流水质评价指标间的相关性，为评价青海湖流域河流生态系统提供科学依据。[方法] 通过对青海湖流域内主要河流沿海拔梯度进行野外采集河流水样、河岸表层土壤和统计植被生长特征，并且结合室内试验分析。[结果] 青海湖流域河流生态系统 18 个评价指标随着海拔梯度的变化均表现出一定规律性，河岸植被、表层土壤及河流水样各评价指标间具有明显的相关性。由相关分析和主成分分析可知，COD(化学需氧量)与 Pb、盖度与有机质、生物量与丰富度间具有极显著正相关($p<0.01$)，河岸土壤砂粒与河流水中全氮含量、全盐量与盖度、砂粒与丰富度间具有极显著负相关($p<0.01$)；化学需氧量、有机质、盖度和砷元素可以作为评价河流生态系统优良状况的主要指标。[结论] 人类活动对青海湖流域沿河草甸生态系统的负面影响已经显现，必须降低草场的载畜量和减少不必要的工程建设，以实现区域生态、社会和经济可持续发展。

关键词：青海湖流域；河岸植被；河岸土壤；河流水质；相关性

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)05-0278-05 **中图分类号**：X826

文献参数：李少华，王学全，高琪，等. 青海湖流域河流生态系统评价指标间的相关性[J]. 水土保持通报，2016，36(5)：278-282. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.051

Correlation Among Evaluation Indexes of River Ecosystem in Qinghai Lake Basin

LI Shaohua[1], WANG Xuequan[1], GAO Qi[2], LAN Lan[1], YANG Zhanwu[3]

(1. *Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*;
2. *College of Grassland, Resources and Environmental, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*; 3. *Qinghai Forestry Research Institute, Xining, Qinghai* 8100016, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to study correlation among the ecological characteristics of riparian meadows, riparian soil properties and river water quality, in order to provide a solid basis for the evaluation of river ecosystem in Qinghai Lake basin. [Methods] Along altitudinal gradient of main rivers in the field, we collected water samples, riparian topsoil samples and investigated vegetation characteristics, and analyzed samples in laboratory. [Results] The 18 evaluation indexes of river ecosystems exhibited the certain regularity along elevation gradient in Qinghai Lake basin. Obvious correlation existed among the evaluation indexes of the riparian vegetation, surface soil and river water quality. Significant positive correlation was found between chemical oxygen demand(COD) and Pb, coverage and soil organic matter content(SOC), biomass and richness($p<0.01$), while significant negative correlation found between the riparian soil sandy grains and river water nitrogen content, soil salt content and coverage, sand grains and richness($p<0.01$). The principal component analysis indicated that the COD, soil organic matter, vegetation coverage and As can be used to evaluate river ecosystems. [Conclusion] The negative impacts of human activities had emerged on the riparian meadow ecosystem. To achieve sustainability of regional ecological, social and economic development, the grassland stocking rates must be decreased and unnecessary construction projects reduced.

Keywords: **Qinghai Lake basin; riparian vegetation; riparian soil; river quality; correlation**

收稿日期：2015-12-17 **修回日期**：2016-02-01

资助项目：国家自然科学基金重点项目“青海湖流域生态水文过程与水分收支研究”(41130640)；林业公益性行业科研专项“戈壁生态系统长期定位观测研究”(201404304)

第一作者：李少华(1992—)，男(汉族)，河南省范县人，硕士研究生，主要研究方向为干旱区水文水资源。E-mail：2227401357@qq.com。

通讯作者：王学全(1965—)，男(汉族)，内蒙古自治区武川县人，博士，研究员，主要从事干旱区水文水资源及荒漠化防治方面的研究。E-mail：wxq@caf.ac.cn。

随着全球气候变化和人类不合理活动的加剧,区域生态环境不断退化,逐渐影响着当地居民的生存与发展[1-2]。青海湖流域位于青藏高原高寒区的东北部,是中国重要的气候调节器和动植物栖息地,属于生态系统敏感区和脆弱带[3]。河流生态系统作为流域湿地生态系统的重要组成部分,与流域内湿地生态系统的健康状况紧密相联,并且河流因具有养分循环、净化污染物、提供湟鱼和野生动物栖息地、补给地下水等生态功能,而被作为能够反映青海湖流域生态系统优劣的重要指示器[4-5]。同时,青海湖流域是青海省重要的水源涵养地和畜牧业区,流域内生态环境的优劣对三江源、柴达木以及海东地区的环境保护和农牧业发展具有重要影响[6-7]。然而,近年来由于过度放牧、城镇扩张、旅游活动、交通运输、工程建设等人类活动急剧增加,使得流域内沿河原生草甸区植被与土壤均出现不同程度的退化,湿地萎缩,土壤侵蚀加剧,甚至演变为黑土滩,导致生态环境保护与社会经济发展的矛盾日益突出[8]。青海湖流域内山区乡镇和交通干道均沿河分布,公路成为实施不合理活动以及破坏区域生态环境的主要廊道,使河岸草甸区的植被和土壤不断退化,河流水质逐渐恶化[9],威胁着河流生态系统的安全,最终对青海湖流域生态环境产生十分不利的影响。

目前对青海湖流域河流生态系统的研究主要有以下成果:侯昭华等[10]通过采集 5 条主要地表河流水样,分析了青海湖流域河水中 8 大离子的化学组成特征及主要控制因素;李岳坦[11]研究了沙柳河河岸植被群落的退化机理并提出了恢复对策与建议;田郁溟等[12]分析了青海湖流域河流下游土壤理化性质及重金属分布特征;张涛等[13]利用青海湖流域内的气象资料,MODIS 遥感影像数据,地理信息系统技术和 CASA 模型,获取了 2000—2012 年流域内的 NPP 值,并对其时空分布规律进行了评价;崔步礼等[14]对青海湖流域河流水化学性质和稳定同位素的特点进行了分析;但是以上均没有以青海湖流域河流生态系统为基础,对不同海拔梯度处河流生态系统现状进行研究。

鉴于此,本文拟通过沿青海湖流域的 7 条河流进行野外调查取样和室内试验分析,统计植被种类、高度、盖度和地上生物量等基本指标,测定土壤机械组成、有机质和全盐量来反映表层土壤的理化性状,测定化学需氧量、氨氮、总磷、总氮、镉、砷、汞和铅来反映河流水质;采用相关分析研究河岸植被、土壤、河流水体各评价指标间相关性和主成分评价出影响河流生态系统优良状况的主要指标,以期能为青海湖流域经济快速发展背景下河流生态系统的环境保护提供数据支持。

1　研究区概况

青海湖流域具有夏季短暂凉爽、冬季寒冷漫长、气温日较差大等高原大陆性气候特点[15],位于 97°51′—101°20′E,36°15′—38°20′N,流域总面积为 29 661 km^2,地势为西北高、东南低,年平均气温为 -1.1～4.0 ℃,年平均降水量为 291～579 mm,属于典型的高寒半干旱气候区[16]。主要河流有布哈河、沙柳河、哈尔盖河、泉吉河、甘子河、黑马河和倒淌河;主要植物有肋果沙棘(*Hippophae neurocarpa*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、嵩草(*Kobresia pygmaea*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、早熟禾(*Poa annua*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、赖草(*Leymus secalinus*),土壤类型主要有高山草原草甸土、山地草甸土、山地灌丛草甸土、栗钙土及风沙土[3]。

2　研究方法

2.1　采样及样品处理

野外试验于 2015 年 7 月初进行采样调查,沿青海湖流域内 11 条河流在海拔 3 300,3 400,3 500,3 600,3 700 m 处共设置 32 个样地,同一海拔梯度处有 6～7 个样地,相对高差小于 5 m,如表 1 中所示。植被与土壤取样方法:为减小试验误差,保证样地间坡度、坡向及与河距离基本一致,样地面积为 5 m×10 m,内部打好 1 m×1 m 网格,随机选择 3 个 1 m^2 的样方,先调查样方内植物种数、高度和盖度,然后齐地割取地上植被以测定生物量,最后在各标准样方中沿“S”曲线采集 0—20 cm 表层土样 1 kg,风干后用于试验分析[17]。水样采集方法为:在距河流凹岸 50 cm、距水面 20 cm 处采集 1 L 水样放入 4 ℃车载冰箱内保存,全部采集完样品后立即送至实验室化验分析。

植被生物量测定方法为在 105 ℃杀青 15 min 于 70 ℃下烘植物 48 h 后称重;土壤机械组成采用比重计法测定[18],按国际制划分,砂粒(2.0～0.02 mm)、粉砂粒(0.02～0.002 mm)和黏粒(0～0.002 mm);土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法测定,全盐量采用 8 大离子总和法测定[19];水质测试指标有化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)和铅(Pb),参照国家标准水质分析方法[20]。以上试验均在普尼测试公司完成测定。

2.2 数据处理

植物多样性计算方法如下。

(1) 丰富度指数:$R=S$

式中:S——样地内植物种数。

(2) 采用Shannon-Wiener指数(H)测定群落多样性:

$$H=-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i$$

式中:P_i——第 i 个物种的相对多度;采用SPSS统计软件中的单因素方差分析(one-way ANOVA)程序进行方差分析,使用最小显著差数法进行多重比较,应用典型相关分析(CCA)对河岸植被、土壤和河流水质各评价指标进行分析,应用主成分分析(PCA)筛选出河流生态系统优劣主要指标。

表 1 青海湖流域不同样地基本情况

海拔/m	样 点	主要植被类型
3 700	YK-1,XRH-1,JH-1,SL-1,HEG-1,GZ-1	高山风毛菊、荨麻、星星草、高山嵩草、龙胆、珠牙蓼
3 600	YK-2,XRH-2,JH-2,SL-2,HEG-2,HM-1	金露梅、鸢尾、矮生嵩草、披针叶黄、猪毛菜、毛茛
3 500	BH-1,XRH-3,QJ-1,JEM-1,SL-3,HEG-3	砂珍棘豆、珠牙蓼、苔草、蒲公英、沙生冰草、针茅、蒿
3 400	BH-2,JH-3,JEM-2,SL-4,HEG-4,GZ-2,DT-1	柽柳、针茅、草地早熟禾、垂穗披碱草、茏茏草、沙蒿
3 300	BH-3,QJ-2,SL-5,HRG-5,GZ-3,DT-2,HM-2	蒲公英、狼毒、沙蒿、盐地风毛菊、委陵菜、芦苇、碱蓬

注:YK为阳康曲;XRH为夏日哈曲;JH为峻河;SL;沙柳河;BH为布哈河;HEG为哈尔盖河;JEM为吉尔孟河;GZ为甘子河;QJ为泉吉河;HM为黑马河;DT为倒淌河。

3 结果与分析

3.1 青海湖流域植被与土壤性状分布特征

如表2中所示,河岸草甸区植被各生长指标随着海拔变化发生显著变化,平均盖度由90.3%减少到39.2%,平均高度由2.3 cm增加30.6 cm;生物量先增加后降低,呈现"Λ型"变化,3 400 m处达到最大,总体上流域内地上生物量偏低,平均仅为146.1 g/m^2,说明沿河植被退化比较严重;总的来看,物种丰富度指数和植物群落多样性指数与海拔高度呈现负相关的关系,但丰富度指数差异显著($p<0.05$),群落多样性指数较高,整体上变化差异不明显。

随着海拔梯度的降低,0—20 cm层土壤机械组成各径级比例发生显著变化,黏粒和粉砂粒含量显著增加,砂粒含量显著减少($p<0.05$);土壤中各径级组成比例在各海拔间差异显著,均为砂粒>粉砂粒>黏粒,质地类型为砂质壤土或砂质黏壤土。

河岸草甸表层土壤有机质含量丰富,平均高达83.9 g/kg,并且随海拔的降低呈现显著下降趋势($p<0.05$),海拔梯度间降幅比例依次为13.3%,18.0%,21.0%和36.7%。土壤全盐量随着海拔的降低而显著增加,并且海拔梯度间差异显著($p<0.05$),其平均值为1.67 g/kg,盐化类型为Ca^{2-}-HCO^{3-},在不同水文地质条件、年降雨量、蒸发强度等因素影响下表现出空间异质性。

表 2 青海湖流域各样地河岸草甸区基本调查情况

海拔/m	植被生长状况					0—20 cm层土壤基本性状				
						不同粒径组成/%			有机质/	全盐量/
	盖度/%	高度/cm	生物量/(g·m^{-2})	丰富度 R	多样性 H	黏粒	粉砂粒	砂粒	(g·kg^{-1})	(g·kg^{-1})
3 700	90.3±16.1^a	2.3±0.6^d	87.2±7.6^e	13±2^d	2.29±0.14^b	6.7±1.2^c	13.2±4.3^c	80.1±7.2^a	119.4±12.4^a	0.62±0.09^d
3 600	75.4±13.2^b	4.1±1.7^c	124.1±16.4^d	21±4^c	2.35±0.08^b	8.9±0.8^c	17.5±0.9^b	73.6±4.8^b	103.5±18.7^b	0.87±0.21^d
3 500	69.8±9.4^b	23.9±4.6^b	169.8±23.5^b	25±3^b	2.64±0.21^a	14.7±1.9^b	19.8±2.1^b	65.5±1.6^c	84.9±10.1^c	1.39±0.15^c
3 400	52.9±7.2^c	27.1±4.3^a	205.7±17.4^a	31±2^a	2.92±0.05^a	16.5±2.4^b	24.6±1.7^a	58.9±4.7^d	67.1±3.8^d	2.14±0.28^b
3 300	39.2±14.9^d	30.6±2.9^a	143.5±8.9^c	30±4^a	2.86±0.10^a	20.8±2.1^a	28.9±3.4^b	50.3±1.4^e	42.5±5.6^e	3.38±0.51^a

注:数值为"平均值±标准差";不同小写字母表示各海拔间具有显著差异($p<0.05$)。下同。

3.2 青海湖流域河流水质状况分布特征

参照地表水环境质量标准(GB3838-2002)[21],对地表水进行水质评价,测定结果如表3中所示。

表3表明,随着海拔梯度的降低,河流水质状况不断下降,水体富营养化逐渐显现,重金属元素不断累积。其中,从水质评价指标的平均含量角度分析,水体中化学需氧量、砷和铅元素为Ⅰ类标准,氨氮和镉为Ⅱ类标准,全磷和全氮为Ⅲ类标准,汞元素为Ⅳ类水质;并且低海拔区(3 300~3 500 m)的水质指标均超过地表水环境质量标准的Ⅱ类标准限值。

因机动车刹车片、润滑油、尾气排放及其他金属

零部件的磨损是 Pb 和 Cd 的主要来源[22],Hg 和 As 重金属元素主要来源于农业灌溉区的化肥及农药污染[23],说明青海湖流域的重金属累积现状与该区域人类活动频繁程度相一致。

表 3　青海湖流域各样地河流水质基本调查情况

海拔/m	营养盐指标/(mg·L^{-1})				重金属指标/(μg·L^{-1})			
	COD	NH_3-N	TP	TN	Cd	As	Hg	Pb
3 700	12.96±0.38^{d}	0.09±0.03^{b}	0.08±0.01^{b}	0.22±0.04^{d}	0.62±0.19^{c}	30.97±2.12^{c}	0.08±0.03^{b}	4.81±0.49^{d}
3 600	11.75±0.92^{d}	0.07±0.02^{b}	0.05±0.02^{b}	0.19±0.07^{d}	0.64±0.23^{c}	31.15±1.94^{c}	0.10±0.03^{b}	5.03±0.58^{d}
3 500	19.83±2.51^{c}	0.14±0.07^{b}	0.16±0.07^{a}	0.48±0.13^{c}	0.71±0.16^{c}	42.82±2.76^{b}	0.14±0.05^{b}	7.97±0.97^{c}
3 400	26.64±3.38^{b}	0.26±0.04^{a}	0.17±0.05^{a}	0.72±0.26^{b}	1.85±0.23^{b}	56.40±3.59^{a}	0.29±0.09^{a}	10.64±1.18^{b}
3 300	37.24±2.14^{a}	0.33±0.10^{a}	0.23±0.09^{a}	0.91±0.15^{a}	2.29±0.40^{a}	61.29±10.18^{a}	0.31±0.08^{a}	13.51±2.03^{a}
均值	14.24	0.18	0.14	0.51	1.22	44.53	0.18	7.59
Ⅰ类标准值上限	15.00	0.15	0.02	0.20	1.00	50.00	0.05	10.00

注:COD 为化学需氧量;NH_3-N 为氨氮;TP 为总磷;TN 为总氮;Cd 为镉;As 为砷;Hg 为汞;Pb 为铅。下同。

3.3　河流生态系统各指标间相关性

通过对青海湖流域 5 个海拔梯度 32 块样地处植被、土壤及水质性状指标间相关性分析,如表 4 中所示,COD 与 Pb、盖度与有机质、生物量与丰富度间的相关系数均大于 0.85,表现为极显著正相关关系($p<0.01$);河岸土壤砂粒与河流水中全氮含量、全盐量与盖度、砂粒与丰富度间的相关系数均小于−0.85,为极显著负相关关系($p<0.01$);COD 与 TN,As,全盐量,全氮与生物量、丰富度,AS 与 Pb,铅与全盐量,高度与生物量,丰富度与有机质,以上指标间的相关系数在 0.626～0.803,表现显著正相关($p<0.05$);盖度与化学需氧量、砷元素与盖度、盖度与高度、砂粒与高度、生物量与砂粒间表现为显著负相关($p<0.05$),相关系数在−0.615～−0.806;其余指标间有一定的相关性,但不具有显著性($p>0.05$)。总之,河流生态系统的大部分评价指标间具有相关性,说明各介质受到人类活动影响具有一定的同源性,并且结合表 2—3 中的数据,可知河流生态系统各介质均受到人类活动不同程度的破坏影响,需要引起广泛关注。

表 4　青海湖流域河流生态系统主要评价指标间的相关系数

指标	COD	TN	As	Pb	盖度	高度	生物量	丰富度	砂粒	有机质	全盐量
COD	1										
TN	0.739*	1									
As	0.682*	0.506	1								
Pb	0.915**	0.498	0.803*	1							
盖度	−0.806*	−0.523	−0.615*	−0.296	1						
高度	0.519	0.417	0.590	0.398	−0.785*	1					
生物量	0.497	0.626*	0.568	0.157	−0.462	0.783*	1				
丰富度	0.523	0.731*	0.194	0.488	−0.391	0.391	0.864**	1			
砂粒	−0.466	−0.889**	−0.375	−0.296	0.178	−0.655*	−0.701*	−0.893**	1		
有机质	−0.518	0.470	−0.462	−0.573	0.890**	0.527	0.569	0.716*	0.385	1	
全盐量	0.639*	0.356	0.513	0.698*	−0.917**	0.286	−0.380	0.294	0.274	−0.928**	1

注:* 表示显著相关($p<0.05$);* * 表示极显著相关($p<0.01$)。

3.4　河流生态系统评价指标的主成分分析

结合植被、土壤及水质指标间的相关分析,选取了以下 10 个指标进行主成分分析,结果如表 5 中所示,可以看出前 3 个主成分的特征值分别为 2.703 1,1.954,1.472 3,均大于 1,并且累积方差贡献率达到 81.78%,可以反映 10 个指标的主要信息。因此,将前 3 个主成分对影响河流生态系统的指标进行筛选,共选取了 4 个公因子方差超过 0.80 的指标,即第 1 主成分为河流水体中的化学需氧量和砷,第 2 主成分为河岸土壤中的有机质,第 3 主成分为河岸植被中的盖度。故将化学需氧量、有机质、盖度和砷元素作为评价青海湖流域河流生态系统优良状况的主要指标。

表 5 青海湖流域主要评价指标的主成分分析

指 标	盖 度	生物量	丰富度	有机质	含盐量	砂 粒	化学需氧量	总氮	砷	铅
第 1 主成分 Z_1	0.399 8	0.320 9	0.402 5	0.471 2	0.511 3	0.461 8	0.925 0	0.459 1	0.881 7	0.483 2
第 2 主成分 Z_2	0.517 6	0.431 9	0.397 2	0.901 5	0.630 8	0.329 1	0.523 7	0.370 3	0.279 6	0.311 9
第 3 主成分 Z_3	0.891 5	0.747 6	0.719 4	0.402 9	0.114 3	0.390 2	0.287 4	0.391 5	0.421 4	0.217 8
公因子方差 V	0.871 2	0.702 3	0.635 6	0.889 0	0.361 6	0.608 4	0.910 8	0.527 5	0.852 9	0.430 2
权重 W	0.125 4	0.108 7	0.094 5	0.132 6	0.053 8	0.088 5	0.143 7	0.073 9	0.117 5	0.061 4
特征值 λ	2.703 1	1.954 0	1.472 3							
方差贡献率 Cr/%	38.02	25.00	18.76							
累计贡献率 TC/%	38.02	63.02	81.78							

4 结 论

在野外调查中发现，海拔 3 300～3 500 m 区域内的青海湖流域，由于受到过度放牧、城镇建设、旅游活动、交通运输、修建公路、铁路及水利工程等不合理的人类活动影响，导致河流生态系统面临前所未有的挑战和压力，人类活动对青海湖流域沿河草甸生态系统的负面影响已经显现。因此，必须减少载畜量和不必要的工程建设，加强对重点区域植被与土壤的保护及河流下游水质监测，依据区域环境承载力和生态功能定位，制定适合青海湖流域的可持续发展规划，以实现青海湖流域的可持续健康发展。

青海湖流域河流生态系统中各指标间具有紧密的联系，河岸植被、表层土壤及河流水质的评价指标间大都存在一定的相关性，其中 COD 与 Pb，盖度与有机质，生物量与丰富度间为极显著正相关性，河岸土壤砂粒与河流水中全氮含量、全盐量与盖度、砂粒与丰富度间为极显著负相关性（$p<0.01$），体现了青海湖流域河流生态系统中各指标间具有紧密的联系。对影响河流生态系统的指标进行主成分分析，筛选出化学需氧量、有机质、盖度和砷元素作为评价青海湖流域河流生态系统优良状况的指标。

[参 考 文 献]

[1] Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, *et al*. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change, 2014,4(1):17-22.

[2] Parsons K. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance [M]. Boca Raton, London, New York: Crc Press, 2014.

[3] 陈桂琛，陈孝全，苟新京，等. 青海湖流域生态环境保护与修复[M]. 西宁：青海人民出版社，2008.

[4] Liu Xiujun, Colman S M, Brown E T, et al. Abrupt deglaciation on the northeastern Tibetan Plateau: evidence from Lake Qinghai[J]. Journal of Paleolimnology, 2014,51(2):223-240.

[5] 江波，张路，欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报，2015,26(10):3137-3144.

[6] 夏继红，陈永明，王为木，等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. 水科学进展，2013,24(4):589-597.

[7] 程雷星，陈克龙，汪诗平，等. 青海湖流域小泊湖湿地植物多样性[J]. 湿地科学，2013,11(4):460-465.

[8] Wang Hong, Long Huiling, Li Xiaobing, et al. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change[J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(2):341-354.

[9] 展秀丽，严平，谭遵泉. 基于 GIS 技术的青海湖流域综合整治类型区划分及整治方向[J]. 地理科学，2015,35(1):122-128.

[10] 侯昭华，徐海，安芷生. 青海湖流域水化学主离子特征及控制因素初探[J]. 地球与环境，2009,37(1):11-19.

[11] 李岳坦. 青海湖流域河岸植被群落结构特征及退化机理研究[D]. 北京：北京师范大学，2010.

[12] 田郁溟，吴枫，张琳，等. 人类活动影响下青海湖环湖地区土壤的生态环境特征[J]. 安全与环境工程，2013,20(3):77-81.

[13] 张涛，曹广超，曹生奎，等. 2000—2012 年青海湖流域 NPP 时空分布特征[J]. 中国沙漠，2015,35(4):1072-1080.

[14] Cui Buli, Li Xiaoyan. Characteristics of stable isotopes and hydrochemistry of river water in the Qinghai Lake Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73 (8): 4251-4263.

[15] 范建华，施雅风. 气候变化对青海湖水情的影响(I)：近 30 a 时期的分析[J]. 中国科学：B 辑，1992(5):537-542.

[16] 王学全. 青海湖流域水资源系统动力学模型构建及其应用[J]. 东北林业大学学报，2012,40(1):93-96.

[17] 张文博，张福平，苏玉波，等. 渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报，2014,34(1):138-143.

[18] 陈丽琼. 比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J]. 环境科学导刊，2010,29(4):97-99.

（下转第 293 页）

[11] 刘巽浩,徐文修,李增嘉,等. 农田生态系统碳足迹法:误区。改进与应用:兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划,2013,34(6):1-11.
[12] 朱亚红,马燕玲,陈秉谱. 甘肃省农地利用碳排放测算及影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2014,35(2):248-252.
[13] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1):217-232.
[14] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京:气象出版社,2000:260-261.
[15] 段华平,张悦,赵建波,等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报,2011,25(5):203-208.
[16] 贺祥,顾欣,杨宗周. 黔东南地区气候变化对能源消费碳排放的响应[J]. 绿色科技,2014(1):3-6.
[17] 王梁,赵杰,秦利,等. 临沂市农田生态系统碳源/汇时空变化及其影响因素分析[J]. 水土保持学报,2015,29(2):183-187,237.
[18] 唐海明,汤文光,肖小平,等. 中国农田固碳减排发展现状及其战略对策[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1755-1759.
[19] 伍芬琳,李琳,张海林,等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(12):2035-2039.
[20] 崔红艳,许维成,孙毓民,等. 有机肥对胡麻产量和品质的影响[J]. 核农学报,2014,28(3):518-525.
[21] 邵锋祥,屈小娥,席瑶. 陕西省碳排放环境库兹涅茨曲线及影响因素:基于 1978—2008 年的实证分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(8):37-43.
[22] 罗海秀,王龙昌. 基于 ArcGIS 的重庆市农田生态系统碳源/汇特征研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2015,40(3):91-97.
[23] 杨皓然,宋戈,杨光,等. 潍坊市农田生态系统碳源(碳汇)及其碳足迹变化[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2015,41(1):82-88.

(上接第 282 页)

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2007.
[20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
[21] 国家环境保护总局. (GB3838-2002)地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
[22] 王冠星,闫学东,张凡,等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. 环境科学学报,2014,34(2):431-438.
[23] 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报,2014,30(6):88-96.

(上接第 287 页)

[9] 郭存芝,罗琳琳,叶明. 资源型城市可持续发展影响因素的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(8):81-89.
[10] 陶晓燕. 资源枯竭型城市生态安全评价及趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(2):53-59.
[11] 马文明,卞正富. 基于 RS 的平顶山土地利用动态变化研究[J]. 测绘科学,2007,32(6):176-178.
[12] 王亮,宋周莺,余金艳,等. 资源型城市产业转型战略研究:以克拉玛依为例[J]. 经济地理,2011,31(8):1278-1282.
[13] 朱琳,卞正富,朱环. 资源枯竭型城市转型期土地利用与城市发展耦合关系分析[J]. 城市土地,2013,54(6):54-59.
[14] 冯思静,姜滢,张新联. 辽西北半干旱区煤炭资源型城市环境容量评价[J]. 水土保持通报,2013,33(4):18-25.
[15] 任海,彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京:科学出版社,2001:107-121.
[16] 阿里木江. 卡斯木,安瓦尔·买买提明,王晓峰. 新疆克拉玛依市产业结构调整对策研究[J]. 新疆师范大学学报:自然科学版,2009,28(1):78-82.
[17] Risser P G, Iverson L R. 30 years later—landscape ecology: Directions and approaches[J]. Landscape Ecology, 2013,28(3):367-369.
[18] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容[J]. 生态学报,2002,22(7):1135-1142.
[19] Hassett E M, Stehman S V, Wickham J D. Estimating landscape pattern metrics from a sample of land cover[J]. Landscape Ecology, 2012,27(1):133-149..
[20] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 白洋淀流域景观空间格局随高程分异研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):75-81.
[21] Shao Guofa, Wu Jianguo. On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data[J]. Landscape Ecology, 2008,23(5):505-511.
[22] 减淑英,倪宏伟,李艳红. 资源型城市土地利用变化与湿地生态安全响应:以黑龙江省大庆市为例[J]. 地理科学进展,2004,23(5):34-42.