

长寿湖水库沉积物有机碳的垂直变化特征

高进长^{1,2}, 龙翼¹, 张信宝¹, 贺秀斌¹, 王铭烽^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所

山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为揭示长寿湖水库沉积物有机碳的垂直变化特征,采用重力采样器采集水库沉积泥沙,测定了沉积物样品的容重、颗粒组成、总有机碳(TOC)等。结果表明:自 1956 年水库建成后,长寿湖水库采样点沉积物的厚度为 92 cm,年均沉积深度为 1.59 cm。沉积物颗粒粒径随深度减小呈现出先变细,再变粗,表层变细的变化趋势。沉积物中 TOC 平均含量为 14.14 g/kg,从建库开始,采样点沉积物中 TOC 的含量变化趋势是先减小;随着人类活动的加剧导致土地利用发生较大变化,如退耕还林、城市化进程加快等,特别是水面上肥水网箱养鱼等活动,使沉积物中 TOC 含量逐渐增加;在 2004 年长寿湖水库全面禁止肥水养鱼后,TOC 含量逐渐减小。研究长寿湖水库沉积物有机碳的垂直变化,对认识水库沉积物物理性质、沉积历史及沉积物与人类活动的关系有重要的意义。

关键词:沉积物;有机碳;垂直变化;长寿湖水库

中图分类号:X524; S153.6⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0080-05

Characteristics of Vertical Variation of Organic Carbon in the Sediment of Changshouhu Reservoir, China

GAO Jinchang^{1,2}, LONG Yi¹, ZHANG Xinbao¹, HE Xiubin¹, WANG Mingfeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water

Resources, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To examine the characteristics of vertical variation for organic carbon in the sediment of Changshouhu Reservoir, deposit sediment was collected by using gravity sampler and bulk density, particle sizes and total organic carbon (TOC) were measured. Since the completion of the Changshouhu Reservoir in 1956, the siltation sediment thickness was 92 cm and the annual average sediment depth was 1.59 cm in the sediment deposit of Changshouhu Reservoir. The particle sizes were thinner gradually in the sediment, and increasingly coarser then thinner in the surface. The measured mean content of TOC was 14.14 g/kg in the sampling site. Since 1956, the trend of the content of TOC decreased, and gradually increased from the late 1980s for the change of land-use such as returning farmland to forest and urbanization in the Longxi catchment and especially the cages fish farming and fertilizer fish farming in the Chagnshouhu reservoir, and decreased gradually in 2004 when the ban for fertilizer framing fish was initiated. In addition, the present results would be helpful for studying the history of sediment and future controlling eutrophication in the Changshouhu Reservoir.

Keywords: sedimentation; organic carbon; vertical variation; Changshouhu Reservoir

水库作为特殊的半自然半人工水体,其水深、水动力学、水生态系统等特征明显区别于湖泊^[1]和海洋,是具有重要研究价值的水体类型。水库沉积物的连续性及其剖面保存的完整性,可以敏感、高分辨地记录区域环境变化,提供时间分辨率达 1~10 a 的高精度环境信息^[2-3],同时,水库与人类活动密切相关,

流域内人类活动的信息也保存在沉积物。有机碳是水库沉积物的主要组分之一,主要来源于水库水生植物、流域侵蚀带来的陆源植物碎屑,受到地貌过程、生态过程和水文过程等的影响,也受到人类活动如修筑大坝、毁坏森林、大规模退耕还林及城市化等的影响。因此,有机碳是描述水库沉积物中有机物质的一项基

收稿日期:2015-10-08

修回日期:2015-10-21

资助项目:中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB3-09);国家科技支撑计划(2011BAD31B03);国家自然科学基金(41101259,41201275)

第一作者:高进长(1984—),男,河南安阳人,博士,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:jzhgao@imde.ac.cn

通信作者:龙翼(1976—),男,湖北黄冈人,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:longyi@imde.ac.cn

本参数,其携带着的不同时间流域环境变化和人类活动信息,可以反映全流域范围内自然过程和人类活动的详细记录^[4-5]。近年来,随着人类经济活动对流域地表和水库干扰程度的加剧,水库水质恶化、富营养化发展迅速,严重制约着区域社会经济的发展和人民生活水平的提高^[6],这些变化既与流域范围内日益剧烈的人类活动有关,如乡镇工业的异军突起、土地利用结构发生变化、城市规模急剧扩张,又有可能是流域自然沉积演化的自然结果^[7]。总有机碳(TOC)是以碳的含量表示沉积物有机物总量的综合指标,可以较全面地反映出沉积物的污染程度及水库水的污染程度。水库沉积物有机碳在数量和性质等方面已经发生并且仍在发生着显著的变化,而这些变化将在沉积物的垂直变化中得以反映。

本文探讨长寿湖水库沉积物有机碳垂直变化特征及其与人类活动的相互关系,对认识沉积物特征、历史变化及人类活动之间的关系有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长寿湖水库位于重庆市长寿区境内,距重庆市主城区 100 km,距长寿城区约 20 km,水域面积约 65.5 km²,总库容为 10 亿 m³,一般水深 15 m,地理位置为 29°50′—30°04′N, 107°15′—107°25′E。长寿湖水库属于大型水库,始建于 1954 年,于 1956 年建成,其最初功能为发电、蓄水和灌溉。龙溪河是长寿湖水库的主要河流,其发源于重庆市梁平县境内,流经梁平县、垫江县和长寿区,最后汇入长江,龙溪河长约 220 km,流域面积约 3 150 km²,多年平均径流量约为 54.0 m³/s,是重庆市辖区内流入长江的主要一级支流。龙溪河沿岸的梁平、垫江两县是重庆市最大的平坝地区和重要的粮食产地,近 30 年来,随着经济的快速发展,城市污水和工业废水排放量逐步增加,并通过龙溪河流入长寿湖水库,对长寿湖水库及水库沉积泥沙产生了一定的影响。

长寿湖水库也是重庆市最大的湖泊旅游风景区和重要的淡水鱼养殖基地之一。20 世纪 90 年代,由于水库肥水网箱养殖的发展,以及养殖密度的不断提高,长寿湖水库开始人工投放饲料和肥料,采用投饵式的肥水网箱养殖,产生大量的残饵和鱼类粪便,并且在水库泥沙中不断沉降和积累,使沉积泥沙中有机物的含量不断增加,对水库环境造成一定的负面影响^[8-9]。

1.2 采样点的布设与样品采集

选择长寿湖水库为研究对象,是因为长寿湖水库兴建时间距今 50 多年,自水库建成后,库底没有进行

清淤,并且对研究三峡水库的沉积物淤积及有机碳的特征有一定的借鉴作用。2014 年 5 月,我们对重庆市长寿湖水库进行了实地考察,并调查采样。为了使调查数据更具代表性,选取典型样点在龙溪河主流流入长寿湖水库的入口处,上游携带着泥沙、工业废水等经龙溪河进入长寿湖水库,东西两侧均分布着果园,岸边村落密集,采样点位置见图 1。

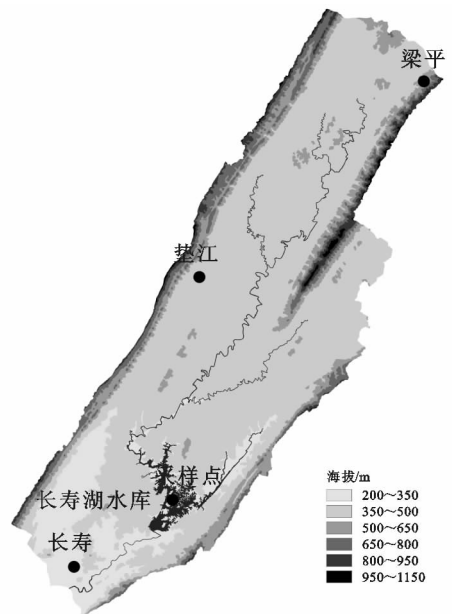


图 1 研究区概况

用重力采样器采集沉积物(model HR, RIGO Co. Ltd., Saitama, Swit),采样方法是将长 2 m、内径 6 cm 的 PVC 管伴随钢管,通过锤击将 PVC 管垂直打入水库底泥中,直至打到硬底无法锤入,垂直拔出钢管后,将 PVC 管取出,两端封闭,垂直放置,直至实验室,避免沉积物干扰和损失,以获得完整的原状沉积物样芯。

1.3 样品处理与分析

在龙溪河主流入口处,随机采集两个重复沉积样芯,分析发现,二者具有相似的层理变化和相同的深度,故任意选取一个沉积样芯,作为研究对象。从沉积物表层,将沉积物样芯按照 2 cm 等厚分层取样,以(50±2)℃烘箱烘干,分别称量分层取样的湿样品与烘干样品重量,再由已知样品体积(56.5 cm³),求出沉积物样品湿容重和干容重,本文章采用的是干容重,简称容重。样品干燥后,去除各种杂质,经玛瑙研钵研磨处理后过 10 目尼龙筛,用 MasterSizer 2000 激光粒度仪(英国)对其进行粒度组成测试,分析前在样品中加入双氧水(H₂O₂)和盐酸(HCl),去除沉积物中的有机物,然后再加入分散剂六偏磷酸钠,并经超声波震荡 90 s,使样品颗粒充分分散,最后用激光粒度仪进行分析。根据国际粒级制分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~

0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)。

样品经玛瑙研钵研磨处理后,再磨细过 100 目尼龙筛,用 10%的盐酸酸化处理,除去无机碳后,采用常量元素分析仪(Vario MACRO cube,德国 Elementar 公司生产)测定沉积物有机碳,测试质量为 60~80 mg。

2 结果与分析

2.1 长寿湖水库沉积物物理特征

长寿湖水库沉积物容重受质地、有机质含量、土壤结构、土壤松紧度等的影响。长寿湖水库采样点沉积物表层到 92 cm 处,平均容重为 0.47 g/cm³。如图 2 所示,整体上,沉积物从底层到表层,容重先减小,在中间部分上下波动,在表层有再次变小的趋势。容重在沉积物样芯的 92 cm 处,骤然变小,这是因为长寿湖水库于 1956 年建成,在修建之前,采样点是耕地或河岸,土壤质地和结构等与修建水库后沉积泥沙的有巨大差异,表现为容重的骤然变化,因此,可以推断,自 1956 年水库建成后,采样点沉积泥沙的厚度为 92 cm,年均沉积深度为 1.59 cm/a。

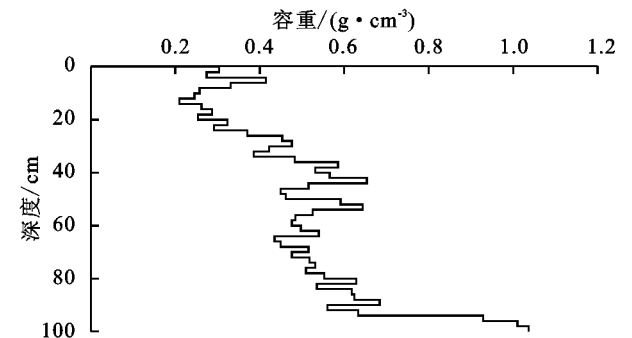


图 2 长寿湖水库沉积物样芯的容重剖面变化

图 3 为长寿湖水库采样点的沉积泥沙颗粒组成特征。黏粒(2.81%~14.63%,均值 6.91%)与粉粒(58.90%~93.31%,均值 76.79%)相比较,占据整个泥沙颗粒组成的比例较大,而砂粒(1.86%~38.29%,均值 16.30%)所占比例也较大。分析沉积泥沙颗粒组成可知,整体上,沉积泥沙颗粒随深度减小表现先变细,再变粗,表层变细的趋势。经 Pearson 相关性分析,TOC 与黏粒、粉粒,均呈现负的极显著相关关系(分别是 $r=-0.860$ 和 $r=-0.938$),而 TOC 与砂粒之间具有正的极显著的相关性($r=0.975$),表明沉积泥沙的总有机碳主要赋存在泥沙细颗粒上,一般情况下,沉积物 TOC 与黏粒、粉粒紧密结合,随着泥沙细颗粒含量增加而呈现增加趋势。杜德文等^[10]研究发现,有机碳(有机质)主要富集在细颗粒沉积物中(含黏土和粉砂较多),罗建育等^[11]在研究台湾嘉明湖时也得出有机质含量与细颗粒物质有对应关系,刘清玉等^[12]发现巢湖内两个样柱样品有机碳含量变化

与粒度及粒级的相关性,表现为有机碳与平均粒径存在一定的负相关关系,而与黏粒百分含量存在一定的正相关性。

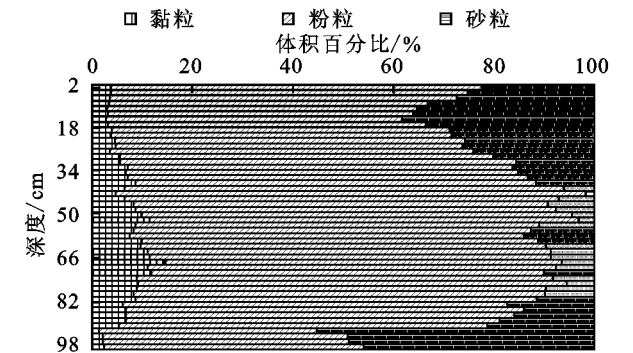


图 3 长寿湖水库沉积物颗粒组成百分比分布

方差反映的是离散程度,由表 1 所示,采样点沉积泥沙,黏粒的离散程度最小,粉粒次之,砂粒的离散程度最大。变异系数(C_v)是指标准差与算数平均值的比值,根据变异系数的大小,可以比较它们的变异程度。一般认为, C_v 的大小分为 3 个级,分别表现为: $C_v<0.1$ 表现为为弱变异性, C_v 在 0.1~1 为中等变异, $C_v>1$ 为强变异^[13]。沉积泥沙样品颗粒组成的变异系数较小,均为 0.1~1,都属于中等变异(表 1),说明在垂直分布上,长寿湖水库沉积泥沙颗粒,变异大小为砂粒>黏粒>粉粒。同样地,计算出有机碳在垂直深度的变异系数为 0.18,说明有机碳的垂直变化属于中等变异程度。

表 1 长寿湖水库沉积物颗粒组成参数

颗粒	数量/ 个	最小 值/%	最大 值/%	平均 值/%	方差	变异 系数
黏粒	46	2.81	11.80	6.96	7.44	0.39
粉粒	46	58.90	93.31	76.73	57.37	0.10
砂粒	46	1.86	38.29	16.32	93.95	0.59

在长寿湖建设初期,沉积泥沙中颗粒较粗,主要是因为 1956 年水库建成后,水位升高,库岸不稳定,库岸侵蚀严重,原土壤或库岸受到浸泡、冲刷,表层泥沙随着水流进入水库,并沉淀淤积。在 20 世纪 80 年代末期至 2005 年,沉积泥沙颗粒组成表现出粗化的趋势,可能由于近些年进行的退耕还林、耕地保护政策,土地利用发生变化,致使土壤侵蚀和水土流失发生改变,因此沉积物泥沙颗粒粒径变粗,容重变小。由于历年降雨量的变化及引起的土壤侵蚀的变化,水库沉积物颗粒组成发生变化,尤其是在特大暴雨及山洪时,黏粒、粉粒及砂粒将呈现峰谷值变化,说明沉积物有机质的输入与地表植被严重破坏区的水土流失密切有关。自 2005 年以来,泥沙颗粒组成逐渐变细,可能是龙溪河流域退耕还林政策和长寿湖水库禁止肥水养鱼政策对泥沙的影响。根据本课题组已有研究,

确定沉积物样芯在表层、14 cm、42 cm、84 cm 和 92 cm,对应的年份分别为 2013 年、2005 年、1989 年、1963 年、1956 年。

2.2 长寿湖水库沉积物中 TOC 的垂直变化特征及与人类活动的关系

将 1956 年以来长寿湖水库沉积物中 TOC 含量作图(图 4)。沉积物底层的 TOC 最小值为 6.94 g/kg,最大值是 27.69 g/kg,沉积物底层的 TOC 平均含量为 (14.14 ± 0.92) g/kg,标准差为 6.22。采样点沉积物中的 TOC 垂直分布特性,底层 92—84 cm,TOC 含量逐渐降低;在沉积物样芯 84—42 cm 深度,TOC 含量变化较小,仅有较小的波动;42—14 cm,TOC 含量逐渐增加,14 cm 至表层,TOC 含量又明显降低。应用 Pearson 相关性分析长寿湖水库采样点沉积泥沙的颗粒组成与 TOC 的相关关系,结果表明,TOC 和泥沙颗粒组成之间,存在极显著相关关系,说明长寿湖沉积物颗粒组成与有机碳关系紧密,径流作用进入到水体的土壤颗粒将会对沉积物的颗粒组成和有机碳的分布产生一定的影响。

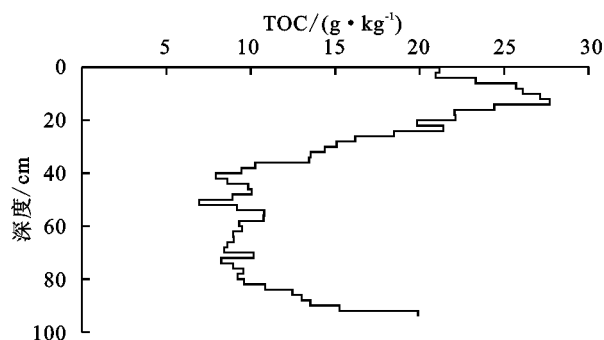


图 4 长寿湖水库沉积物 TOC 含量的垂直分布

因为长寿湖水库水位较深(约 15 m),水库沉积物有机碳受水体扰动较小,有机碳主要来自龙溪河上游水土流失中的土壤、沿湖场镇生活污水、城市污水、周边果林、农田水土流失携带的泥沙等。沉积物与岸边土壤各级粒径有机碳分布特征均具有一定的差异,一般情况下,沉积物有机碳平均含量高于土壤,其中,大多数存在于黏粒,其次是粉粒^[14]。在沉积泥沙中,一部分有机质在生物化学作用条件下迅速分解,一部分沉积下来,将会改变被淹没土壤的化学性质,导致不稳定碳释放到水中^[15]。宋金明^[16]和朱广伟等^[17]研究发现,氧化还原环境是控制沉积物有机质矿化的主要因素,随着深度的增加,矿化作用明显,沉积泥沙的有机碳含量逐渐降低。

人为活动会大大增加沉积物有机质的输入。在 20 世纪 80 年代末以前,龙溪河流域是以农业种植业为主,较大型的工业化及城市化还处于起步阶段,对长寿湖水库有机碳的贡献较小,而水库的养殖业以淡水敞

养为主,如图 4 所示,沉积物 42—84 cm,沉积泥沙中有机碳含量变化幅度较小。90 年代以来,随着龙溪河流域特别是梁平县和垫江县工业化和城市化的加快,工业废水和城市污水大量排入到龙溪河,致使长寿湖水库沉积物中有机碳增加,特别是逐步实行的网箱养殖方式,使沉积物中机碳含量逐渐增加。至 1995 年,网箱养殖规模发展到 27 000 m² 左右,因年投饵料达 9 000 t,致使长寿湖水库水质为中度污染;“九五”期间,即 1996—2000 年,推广的肥水网箱养殖技术,在库区水域大面积实行,如 1998 年和 1999 年两年时间内,肥水网箱养殖投放鸡粪 6 000 t 和化肥 7 000 t,肥水网箱养殖使水质进一步恶化^[9];2001 年,龙溪河流域废水总量近 4 000 万 t/a,主要来源于工业废水和城市污水,其对沉积物有机碳也有一定的影响。Howarth 等^[18]对 Hudson 河口沉积物来源分析结果表明,河口周围占比例很小的城市、郊区和农田是 Hudson 河口沉积物中有机质的主要来源。另外,有研究表明,水产养殖增加沉积物中碳含量,如东太湖围栏养殖导致沉积物 TOC 含量增加了 593%^[19]。

沉积物中有机质含量以及藻类活动等因素具有密切关系^[13],当沉积物有机碳含量较高,藻类生长旺盛,夏秋两季藻华爆发,2002 年 7 月,长寿湖水库大面积漂浮植物,“水华”现象引起社会各界广泛重视。2004 年 4 月,长寿湖水库,全面拆除网箱网栏后,禁止肥水养鱼,水质逐渐好转,但是,多年沉积于底泥表层的大量有机物质,作为内源污染物缓慢释放,见图 4,沉积物样芯 14 cm 至表层,沉积物中 TOC 逐渐减小。而据 2009 年长寿新闻网报道重庆市长寿区委员会的报告,长寿湖水库周边 10 个场镇,日产生活费水约 8 000 t,生活垃圾约 32 t,并且均未修建生活污水处理场和生活垃圾处理场,生活废水通过小溪直接排入,对长寿湖水库有机碳的增加还是有很大影响,可见,废水直接排放到河流和水库是人类对河流/水库沉积物有机质输入水库,增加水库沉积物有机碳增加主要影响方式。范成新等^[20]对太湖底泥有机质做了相关研究,研究发现,底泥有机质的分布和人类污染程度呈现正相关性,且在河口处有机质含量明显增加。王新明等^[21]在研究广州感潮河段的底泥有机质时,判定河流底泥中有机质的来源,在河道上游以生物来源为主,而下游主要受到人类活动的影响。

3 结论

(1) 自 1956 年长寿湖水库建成后,采样点沉积泥沙的厚度为 92 cm,年均沉积深度为 1.59 cm/a。沉积泥沙粒径组成随深度减小表现为先变细,再变

粗,表层变细的趋势。

(2) 从长寿湖水库建库开始,长寿湖水库沉积物中 TOC 含量是动态变化的,在建库初期逐渐减小;从 20 世纪 80 年代末期,因龙溪河流域退耕还林、城市化进程等土地利用类型的变化,以及湖面网箱养鱼、肥水养鱼的综合作用,沉积物 TOC 逐渐增加,说明这些人类活动,加剧了水库沉积物有机碳含量;在 2004 年全面禁止肥水网箱养鱼后,沉积物有机碳呈现逐渐减小的特征,说明水库沉积物污染近年有减小趋势。

参考文献:

- [1] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报,2001,21(6):1034-1040.
- [2] 舒卫先,李世杰,姚书春. 太湖 ZS 孔沉积记录的近 50 年来营养盐沉积通量变化[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(3):67-72.
- [3] 张振克,王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. 地球科学进展,1999,14(4):417-421.
- [4] Hedges J I, Clark W A, Quay P D, et al. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River[J]. Limnology and Oceanography, 1986, 31(4): 717-738.
- [5] Richey J E, Hedges J I, Devol A H, et al. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River[J]. Limnology & Oceanography, 1989, 35(2): 352-371.
- [6] 曹加杰,阮宏华. 受损水生生态系统中水生植物生态恢复研究进展[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(11): 125-129.
- [7] 李怀恩,李越,蔡明,等. 河流水质与流域人类活动之间的关系[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(1):24-28.
- [8] 杨钢,张晟,李崇明,等. 重庆长寿湖水水质富营养化的调查及评价[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2003,28

(3):492-495.

- [9] 张晟,李崇明. 长寿湖富营养化调查[J]. 重庆环境科学, 2003,25(3):32-34.
- [10] 杜德文,石学法,孟宪伟,等. 黄海沉积物地球化学的粒度效应[J]. 海洋科学进展,2003,21(1):78-82.
- [11] 罗建育,陈镇东. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近 4000 年气候与环境变化[J]. 中国科学:D 辑,1997,27(4):367-372.
- [12] 刘清玉,戴雪荣,王立群. 巢湖沉积物有机碳分布变化特征[J]. 上海地质,2008(1):13-17.
- [13] Yonker C M, Schimel D S, Paroussis E, et al. Patterns of organic carbon accumulation in a semiarid shortgrass steppe, Colorado[J]. Soil Science Society of America Journal,1988,52(2):478-483.
- [14] 赵兴敏,赵兰坡,郭欣欣,等. 水体沉积物与岸边土壤颗粒组成及有机碳分布特征[J]. 水土保持学报,2014,28(6):304-308.
- [15] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles-consequences of damming[J]. Aquatic Sciences,2002, 64(1):55-65.
- [16] 宋金明. 中国近海沉积物—海水界面化学[J]. 地球科学进展,1998,13(6):590-590.
- [17] 朱广伟,陈英旭. 沉积物中有机质的环境行为研究进展[J]. 湖泊科学,2001,13(3):272-279.
- [18] Howarth R W, Sherman D. Inputs of sediment and carbon to an estuarine ecosystem: influence of land use[J]. Ecological Applications,1991,1(1):27-39.
- [19] 杨清心,李文朝. 东太湖围网养鱼后生态环境的演变[J]. 中国环境科学,1996,16(2):101-106.
- [20] 范成新,季江,隋桂容,等. 太湖底泥蓄积和主要的理化性质空间分布特征[M]. 北京:气象出版社,1998.
- [21] 王新明,盛国英,傅家谟,等. 广州感潮河段底泥有机质特征[J]. 沉积学报,1997,15(2):232-235.

(上接第 79 页)

- [13] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报,2004,24(1):71-74.
- [14] 张晓霞,李占斌,李鹏,等. 土地利用对陕北水土流失区土壤有机碳、水分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2011,25(3):131-134.
- [15] 王莉,张强,牛西午,等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007,15(4):53-56.
- [16] 杨珊,何寻阳,苏以荣,等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1596-1602.
- [17] 杨智杰,崔纪超,谢锦升,等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤性质的影响[J]. 地理科学,2010,30(3):475-480.

- [18] 李新宇,唐海萍,赵云龙,等. 怀来盆地不同土地利用方式对土壤质量的影响分析[J]. 水土保持学报,2005,18(6):103-107.
- [19] 常庆瑞,安韶山. 黄土高原恢复植被防止土地退化效益研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):6-9.
- [20] 彭文英,张科利,陈瑶,等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报,2005,20(2):272-278.
- [21] 李品荣,孟广涛,李国昌. 不同土地利用方式下土壤地力变化和水土流失状况研究[J]. 水土保持研究,2009, 16(3):95-99.
- [22] 赵锦梅,张德罡,刘长仲,等. 祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响[J]. 生态学报,2012,32(2):548-556.