

不同地表覆被下南四湖表层底泥营养元素分布特征

李 爽¹, 张祖陆^{1,2}, 孙媛媛¹

(1. 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014; 2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学, 山东 临沂 276005)

摘 要:对南四湖水生植被区、农田居民地、养殖区、自然水面的 29 个采样点表层底泥 TN、TP 和 TOC 的含量进行分析,揭示了不同地表覆被下表层底泥中营养元素的分布特征,通过对底泥和上层覆水所含营养元素进行相关分析,探讨了营养元素的可能来源。利用有机指数,对底泥有机污染进行了分析。结果表明:南四湖养殖区和农田居民地已经出现富营养化现象,水生植被区和自然水面尚未受到富营养化威胁。表层底泥的 TN 主要来自内源有机氮,TP 主要来自外源无机磷。

关键词:富营养化; 表层底泥; 地表覆被; 南四湖

中图分类号:X524;X502

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0185-05

Distribution Characteristics of Nutrient Elements of Surface Sediments from Different Land Uses in Nansihu Lake, China

LI Shuang¹, ZHANG Zu-lu^{1,2}, SUN Yuan-yuan¹

(1. College of Population Resource and Environmental Science, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China; 2. Shandong Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China)

Abstract: Based on all the 29 samples taken from aquatic vegetation area, agricultural and residential area, fish culture area, natural water of Nansihu Lake, the contents of TN, TP and TOC of water surface sediments were analyzed and the characteristics of the nutrient distribution were examined in the study. Through the analysis of correlation of surface sediments and the water, the origins of these nutrients were discussed, and the level of pollution was analyzed with the organic index. The results indicated that the eutrophication had appeared in agricultural area, residential area and fish culture area, but the aquatic vegetation area and natural water were not threatened by eutrophication. On the other hand, the source of TN in surface sediments was mainly from the organic nitrogen of Nansihu Lake, and the source of TP was mainly from the inorganic phosphorus outside the lake.

Key words: eutrophication; surface sediment; surface land cover; Nansihu Lake

不同的地表覆被,对湖泊水环境具有重要影响,是引起湖泊水环境营养元素含量变化的重要因素^[1-2]。湖泊底泥是湖泊水环境的三大环境要素(水质、水生生物、底泥)之一。湖泊底泥既是湖泊中营养元素的蓄积库,同时在动植物、微生物的作用下,其中的营养元素又会重新释放到水体中,造成湖泊水环境的二次污染^[3-4]。据研究,营养元素在底泥中的富集随着深度的增加呈减小趋势^[5-6],因此,研究不同地表覆被下湖泊表层底泥的营养元素的分布,对掌握营养元素的分布规律具有重要意义,同时为湖泊富营养化的整治提供理论依据。

南四湖是南水北调东线工程重要的输水通道和调蓄湖泊,因此南四湖的水环境问题必将成为南水北调东线工程关注的重点问题之一。据以往研究和调查可知,南四湖有机物超标率达 60% 以上,近年来已受到富营养化的严重威胁。以往对南四湖表层底泥营养元素的研究主要集中在元素的含量分布及其迁移转化^[6-7]上,有关不同地表覆被与表层底泥营养元素含量关系的研究少有报道。有研究表明不同土地利用方式下底泥的氮磷含量差异较大;不同的地表覆被对表层底泥中营养元素的积累、输移和流失有不同的影响^[8-9],对此进行研究,为以后更有针对性的控制

收稿日期:2011-11-21

修回日期:2011-12-29

资助项目:临沂大学水土保持与环境保育重点实验室开放基金(201102);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07210-007-01)

作者简介:李爽(1984—),女,山东济南人,博士研究生,主要研究方向为遥感和地理信息系统在水资源与水环境中的应用。E-mail:ls8412519@163.com

通信作者:张祖陆(1949—),男,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向为水资源与水环境。E-mail:zulzhang@126.com

湖泊富营养化和合理的进行土地利用提供了依据。本文以遥感图像获取的地表覆被信息和实地采样的表层底泥数据为基础,对南四湖不同地表覆被与表层底泥营养元素分布之间的关系进行研究,分析底泥中营养元素的可能来源,为南水北调东线南四湖段水环境的整治提供参考。

1 研究区概况

南四湖位于山东省西南部($34^{\circ}27'—35^{\circ}20'N$, $116^{\circ}34'—117^{\circ}21'E$),从西北到东南,由南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖相互贯通组成,是我国北方东部最大的淡水湖泊,最大湖水面积约为 $1\,266\text{ km}^2$,集水总面积约为 $30\,453\text{ km}^2$,是南水北调东线的重要调蓄枢纽^[10]。1960 年,在昭阳湖最窄处兴建二级坝,将南四湖分为坝北的上级湖和坝南的下级湖。注入南四湖的大小河流共 53 条,流域面积 $1\,000\text{ km}^2$ 以上的河流 10 条,都集中在山东省境内。

南四湖集水源、水产、排污、水运等多种功能,湖区内分布有大片水生植被、水产养殖区、人工农田等。由于流域内城市的飞速发展,工业进程的加快,南四湖受到人类活动的干扰增强,大量的工业、农业和生活污水排入湖中,加之全球变暖、降水减少等自然因素的影响,南四湖内的营养元素浓度不断升高,富营养化问题日趋严重,使得南四湖水环境不断恶化。

2 数据与方法

2.1 数据源

本文所用数据源包括:遥感影像数据、表层底泥采样数据、其它图件和统计数据。遥感影像数据选用环境一号卫星(HJ—1 星)2010 年 6 月 28 日接收的影像,分辨率为 30 m ,共 4 个波段,其中包含 3 个可见光波段、1 个近红外波段。影像清晰且覆盖研究区,研究区内云量小于 5% ,能够满足研究需要。

野外采样时间为 2010 年 9 月 15 日—9 月 21 日,利用重力采样器在南四湖采集了表层底泥样点(0—2 cm)29 个,各点利用 GPS 定位,其中,1—10 号样点位于水生植被区,11—15 号样点位于农田居民地,16—22 号样点位于养殖区,23—29 号样点位于自然水面,各样点分布位置见图 1。

其它图件和统计数据主要包括:研究区河流分布图,水体营养元素含量,各主要河流排污口位置图、各排污口污水营养元素含量等。

2.2 数据处理

2.2.1 遥感影像处理 遥感影像的预处理包括:几何精纠正、大气校正、裁切等。预处理后,利用监督分类和目视解译相结合的方法,对遥感影像进行分类,

利用野外实地勘察样点做检验,将南四湖地表覆被类型分为 4 类:水生植被区、农田居民地、养殖区、自然水面。其中水生植被区面积约为 152 km^2 ,占南四湖总面积的 12% ,主要为自然水生生物如芦苇、荷田、及各类浮水和沉水植被;农田居民地面积约为 138 km^2 ,占总面积的 10% ,主要为湖岸附近被开辟的农田,及湖心的岛屿等人为干扰较大的地区;养殖区面积约为 377 km^2 ,占总面积的 30% ,主要为渔民围网养殖地域;自然水面为自然状态的一般湖水面,面积约为 607 km^2 ,占总面积的 48% 。由于南四湖内营养元素除了受湖区地表覆被的影响,还受整个流域内其它地域土地利用方式的影响,且南四湖主要入湖河流集中于山东省境内,因此,对山东境内南四湖流域除湖区外其它地域的土地利用进行了分类,共分为 5 类:居民地、未利用地、林地、水域和耕地,分别占总面积的 4% , 1.2% , 3.4% , 1.3% 和 90% 。地表覆被和土地利用分类图,见附图 8。



图 1 采样点分布示意图

2.2.2 底泥样品处理 将表层底泥样品置于密封的塑料袋中带回实验室,剔除底泥样品中的贝壳、砂石等杂质,自然风干,将干透的样品研磨,并过 100 目筛。

对表层底泥的营养元素含量进行分析,主要包括:总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)。TOC 采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,在山东师范大学实验室完成。TN 采用重铬酸钾—硫酸消化法测定,TP 用 ICP—AES 方法测定,在国土资源部济南矿产资源监督检测中心完成。各元素的测定通过随机抽取平行样进行对比分析,使得测试误差控制在 10% 以内。

3 结果与分析

3.1 不同地表覆被下表层底泥营养元素的分布

对各样点的营养元素含量进行统计,各样点的 TN、TP 和 TOC 的含量见图 2。

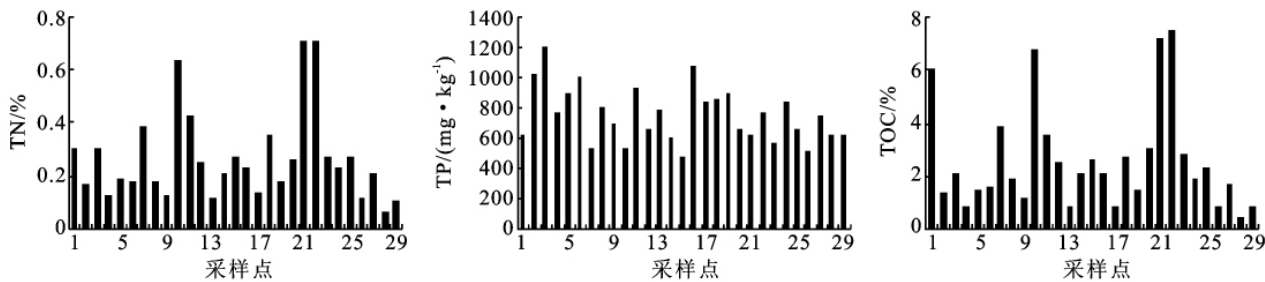


图 2 各样点 TN、TP 和 TOC 含量

由图 2 可以看出,TN 和 TOC 最高值出现在养殖区的样点,低值集中在自然水面。TP 最高值出现在水生植被区,低值集中在自然水面。且样点 TN 和 TOC 的含量分布趋势相似,TN 和 TP 分布趋势差异较大。

不同地表覆被下 TN、TP 和 TOC 的最大值、最小值、平均值及面积加权平均值见表 1。面积加权平

均值的公式如下:

$$M=\frac{S_1 \cdot M_1+S_2 \cdot M_2+S_3 \cdot M_3+S_4 \cdot M_4}{S} \quad (1)$$

式中: M ——加权平均值; S_1, S_2, S_3, S_4 ——四类地表覆被的面积; M_1, M_2, M_3, M_4 ——四类地表覆被下各元素的平均值; S ——南四湖湖区总面积。

表 1 不同地表覆被下表层底泥营养元素含量

营养元素	水生植被			农田居民地			养殖区			自然水面			加权平均值
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
TN/%	0.12	0.62	0.23	0.16	0.30	0.24	0.26	0.71	0.42	0.06	0.27	0.16	0.25
TP/(mg·kg ⁻¹)	524.90	1064	737.79	622.30	739.40	893.54	560.40	917.10	714.96	468.20	890.10	678.13	719.52
TOC/%	0.75	6.73	2.34	1.36	6.02	2.52	2.22	7.41	4.09	0.40	2.56	1.25	2.36
C/N	5.95	10.78	9.24	7.00	20.38	10.48	7.61	11.57	9.51	6.41	9.54	7.67	8.71

通过表 1 可得,四类地表覆被类型总氮的加权平均含量为 0.25%,以养殖区的总氮含量最高,在 0.26%~0.71%之间,平均值为 0.42%,远高于加权平均含量。其次是农田居民地和水生植被区,平均值分别为 0.24%和 0.23%,和加权平均含量相当。自然水面的总氮含量最低,介于 0.06%~0.27%之间,平均值 0.16%,远低于加权平均值。

四类地表覆被类型总磷的加权平均含量为 719.52 mg/kg,其中农田居民地的总磷含量最高,介于 622.3~739.4 mg/mg 之间,平均值为 893.54 mg/kg,远高于加权平均含量。其次是水生植被区和养殖区,平均值分别为 737.79 mg/kg 和 714.96 mg/kg,与总平均值相差不多。自然水面的总磷含量最低,介于 468.2~890.1 mg/kg 之间,平均值为 678.13 mg/kg,远低于加权平均值。

四类地表覆被类型总有机碳的加权平均含量为 2.36%,以养殖区总有机碳平均值最高,达 4.09%,大大超过加权平均值。其次是农田居民地,介于 1.36%~6.02%,平均值为 2.52%;再次是水生植被区,平均值为 2.34%,介于 0.75%~6.73%。自然水面的总有机碳含量最低,平均值仅为 1.25%,远低于加权平均值。

结合图 2 和表 1 可知,TN 和 TOC 的含量由高到低依次为:养殖区>农田居民地>水生植被区>自

然水面。TP 的含量由高到低依次为:农田居民地>水生植被区>养殖区>自然水面。由此可见,养殖区、农田居民地和水生植被相对自然水面而言,C、N、P 的含量较高,显示出一定程度的营养元素富集。

养殖区的 TOC 和 TN 含量最高,而 TP 含量较农田居民地和水生植被区低。高 TOC 和 TN 含量可能是与未分解的动植物残体、水中动植物遗骸、排泄物和人类大量投放的饵料、氮肥、促进鱼类生长的各种药物有关^[10-11];低 TP 可能由于为建国网养殖区,养殖区周边的芦苇、荷花、香蒲等大型水生植物被打捞利用,使得对磷酸盐的吸收量锐减^[10]。太湖湖区的东太湖也存在这种高 TOC 和 TN,低 TP^[11] 的现象。

农田居民地的 TN、TP 和 TOC 含量都较高,主要来源于农田内大量氮肥和磷肥的投放,基于历年济宁年鉴的统计资料,对累年南四湖流域农田氮肥和磷肥的排放量进行估算,农田氮的排放量约为 28.5 kg/(hm²·a),磷的排放量约为 0.3 kg/(hm²·a)^[4,11]。加之居民地产生大量的生活污水,如含磷的洗涤剂、禽畜饲料和粪便、生活垃圾等肆意排放入南四湖,造成底泥内大量营养元素的堆积。水生植被区的 TN、TOC 含量较自然水面高,TP 含量高于养殖区和自然水面。水生植被对底泥中营养元素含量的影响具有双面性,一方面水生植被枯萎后其残骸会造成底泥中

营养元素的富集,另一方面水生植被在生长过程中可以吸收水体和底泥中的营养元素,净化水质,消弱营养元素的富集。自然水面的营养元素含量比其它地表覆被类型都低,主要是因为其受自然因素影响较大,受人为影响较小。

底泥中的碳氮比(C/N)是 TOC 和 TN 的比值(据 GB7857—1987 计算),它能在某种程度上反映出底泥中有机质的来源^[12],生物种类不同,C/N 不同。根据以往学者的研究,一般水生动物和植物的 C/N 为 3~14,陆生高等植物的 C/N 为 14~23^[10,13]。湖泊底泥中的有机质来源可分为内源和外源,内源主要来自湖泊内部水生动植物的残骸,外源主要来自随入湖河流携带来的动植物残骸及其它物质。南四湖湖区四类地表覆被类型 C/N 加权平均值为 8.71,说明南四湖底泥中的营养元素主要来自内源。其中,农田居民地的 C/N 值介于 7~20.38,其平均值最高,达 10.48。说明农田居民地底泥的营养元素属于内源和外源兼有的混合来源,且由附图 8 可知,农田居民地多位于湖泊边缘,易受到外源有机物沉积的影响。其次是养殖区,C/N 值介于 7.61~11.57,平均值达 9.51。再次为水生植被,C/N 值介于 5.95~10.78,平均值为 9.24。自然水面的 C/N 值最低,介于 6.41~9.54,平均值为 6.67。这三类地表覆被下的底泥中营养元素的来源主要来自内源。

3.2 表层底泥中 TN、TP、TOC 和上层覆水 TN、TP 的相关关系

为了进一步探究表层底泥中营养元素的来源,利用 SPSS 软件对表层底泥中 TN、TP、TOC 和上层覆水 TN、TP 的相关关系进行了分析见表 2。

从表 2 中可知底泥中 TN 和 TP 相关系数为 0.215,相关性不显著;TP 和 TOC 相关系数为 0.171,相关性不显著;TN 和 TOC 相关系数为 0.976,相关系数大,且在 0.01 水平下显著相关。这说明底泥中的 TN 和 TOC 具有同源性,总氮中以有机氮居多,有机氮含量几乎占总氮含量的 95%^[4,14];而 TP 则以无机磷为主。

表 2 TN、TP 和 TOC 相关性分析

	底泥 TN	底泥 TP	底泥 TOC	水 TN	水 TP
底泥 TN	1.000				
底泥 TP	0.215	1.000			
底泥 TOC	0.976**	0.171	1.000		
水 TN	0.235	0.677	0.347	1.000	
水 TP	0.137	0.895**	0.122	0.68	1.000

注: ** 表示在 0.01 水平下显著相关

底泥 TN 和上层覆水 TN 的相关系数为 0.235,相关性不高,说明湖泊水的 TN 主要是无机氮,主要

来源于流域内的工农业及生活污水排放,无机氮含量高。如附图 8 所示,济宁市、菏泽市、兖州市等工农业较发达人口聚集地,都处于南四湖的主要入湖河流周边,其产生的大量生产、生活和农业污水都随入湖河流进入南四湖,是南四湖水体中 N 元素的主要来源。而底泥中的 TN 以有机氮为主,主要来自湖泊内水生动植物的残骸及随湖泊流域内的河流进入南四湖的腐殖质^[4]。

底泥中 TP 和上层覆水 TP 的相关系数为 0.895,且在 0.01 水平下显著相关,说明两者具有同源性,均以无机磷为主,主要来自流域内工农业及生活污水的排放,并在一定条件下在底泥中积累。

为验证外源入湖的氮磷对湖泊内氮磷的影响,将南四湖流域内主要的 12 个排污口(见附图 8)断面的 TN 和 TP 含量与对应入湖口底泥样点中 TN 和 TP 的含量做了相关性分析,排污口断面的 TN 和底泥中 TN 的相关系数为 0.347,排污口的 TP 和底泥中 TP 的相关系数为 0.748。由此可见,外源对湖泊内 N 的影响比对 P 的影响要小。

3.3 富营养化评价

有机指数通常作为对水域沉积物环境状况的评价指标^[13-15]。计算方法如下:

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (2)$$

$$\text{有机氮}(\%) = \text{总氮}(\%) \times 0.95 \quad (3)$$

结合南四湖的实际情况,参考其它相关资料^[16-17]和国内相关标准,制定了南四湖的评价标准,见表 3。对各样点有机指数进行计算,不同覆被下表层底泥的有机指数值见表 4。

表 3 有机指数评价标准

有机指数	<0.05	0.05~0.2	0.2~0.5	>0.5
污染状况	清洁	较清洁	尚清洁	富营养化
等级	I	II	III	IV

表 4 不同地表覆被下表层底泥有机指数

项目	水生植被	农田居民地	养殖区	自然水面
最小值	0.09	0.21	0.71	0.02
最大值	1.39	1.69	4.96	0.65
平均值	0.41	0.61	1.99	0.23
等级	III	IV	IV	III
总平均值	0.799			

由表 4 可得,不同地表覆被下表层底泥有机指数的总平均值为 0.799,属于 IV 等级,说明就南四湖全湖而言,已经受到了富营养化的威胁。其中,水生植被区和自然水面的有机指数分别为 0.41 和 0.23,属于 III 等级,尚清洁;农田居民地和养殖区的有机指数分别为 0.61 和 1.99,都处于 IV 等级,已经出现了富营养化现象,尤其是养殖区,富营养化程度较高。有机

指数较高的几个样点如 10, 21 和 22, 它们地理位置相近(图 1), 都位于微山湖的微山岛周边, 这主要由于微山岛是著名旅游岛屿, 岛上的餐饮、游船、莲蓬采摘等对湖底泥的污染较严重。

4 结 论

(1) 通过对不同地表覆被下表层底泥 TN、TP 和 TOC 的含量进行分析, 养殖区和农田居民地的营养元素含量较高, 受人类的干扰最大, 水生植被区和自然水面受人类干扰较小, 底泥中营养元素含量较低。

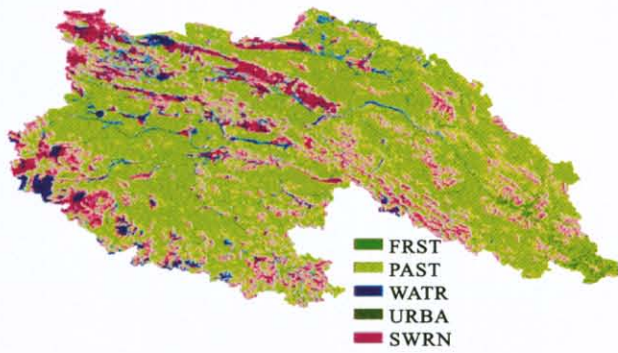
(2) 通过对表层底泥和上层覆水的营养元素进行相关性分析可得, 表层底泥中的 TOC 和 TN 相关性大, 具有同源性, TN 主要为有机氮。表层底泥中 TP 和 TOC 相关性小, 且和上层覆水中 TP 相关性大, 说明 TP 主要为无机磷。并对各地表覆被下的 C/N 值及上层覆水中和各污水排放口的营养元素含量进行分析, 结果表明底泥中的 TN 以内源积累为主, TP 以外源积累为主。

(3) 通过对不同地表覆被下各表层底泥样点的有机指数进行计算, 可在一定程度上反映各地表覆被下表层底泥的营养化程度, 富营养化较严重的是养殖区, 其次是农田居民地, 水生植被区和自然水面尚属清洁。位于微山岛周边受人类扰动严重的地区, 富营养化最严重。

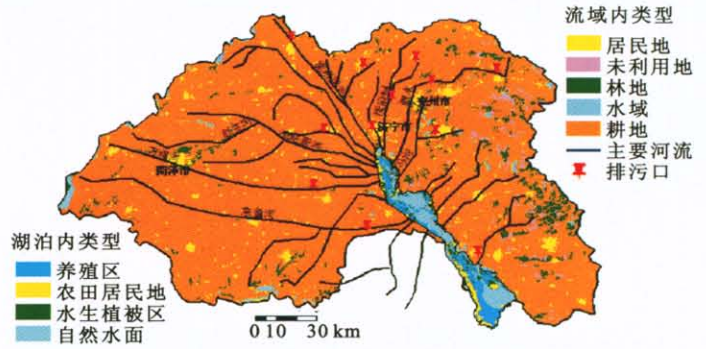
致谢: 对协助野外采样的杜臣昌、吕建树、张伦、于泉洲、孙京姐、程刚, 表示真挚的感谢。

参考文献:

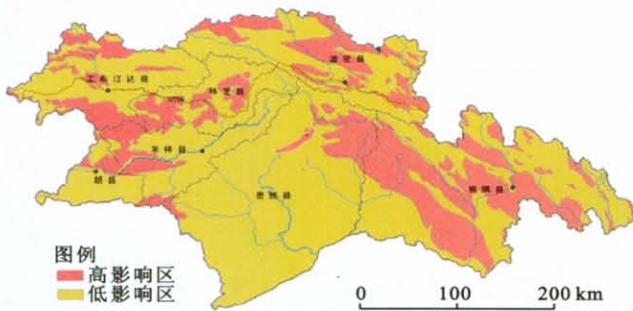
- [1] Bahman J A, Kaneyuki N. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku district of Japan[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(5): 931-956.
- [2] Galbraith L M, Burns W C. Linking land-use, water body type and water quality in southern New Zealand [J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22(2): 231-241.
- [3] Müller H W, Schwaighofer B, Kalman W. Heavy metal contents in river sediments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1994, 72(1/4): 191-203.
- [4] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [5] 陈军, 徐俊, 陈永红, 等. 淮河淮南段底泥氮磷垂直分布研究[J]. *人民长江*, 2008, 39(2): 73-75.
- [6] 张志斌, 张学杨, 张波. 南四湖微山区沉积物磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(5): 1345-1350.
- [7] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(2): 206-209.
- [8] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. *地理学报*, 2002, 57(4): 389-396.
- [9] 张明奎, 王浩, 郑顺安不同土地利用方式下水塘底泥氮磷和重金属的积累及释放特性[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1391-1397.
- [10] 沈吉, 张祖陆, 杨丽原, 等. 南四湖环境与资源研究[M]. 北京: 地震出版社, 2008.
- [11] Qu Wenchuan, Dickman M, Wang Sumin. Multivariate analysis of heavy metal and nutrient concentrations in sediments of Taihu Lake, China[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 450(1/3): 83-89.
- [12] 吕晓霞, 翟世奎, 牛丽凤. 长江口柱状沉积物中有机质 C/N 比的研究[J]. *环境化学*, 2005, 24(3): 255-259.
- [13] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清, 等. 巢湖—富营养化研究[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990: 59-61.
- [14] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM, TN, TP 的现状与评价[J]. *湖泊科学*, 1996, 8(4): 319-324.
- [15] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. *农业环境学报*, 2007, 26(3): 886-893.
- [16] 张雷, 郑丙辉, 田自强. 西太湖典型河口区湖滨带表层沉积物营养评价[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(5): 2-8.
- [17] 城市建设环境科学出版社. 环境检测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.



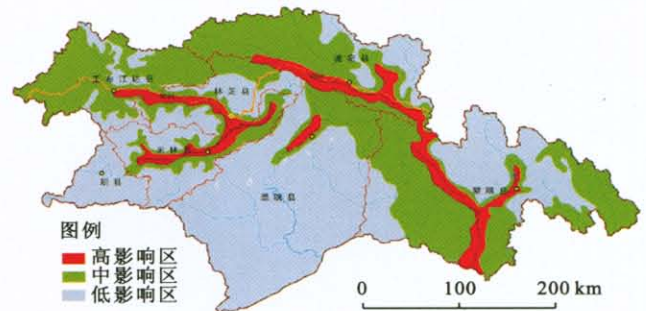
附图7 长江流域2004年土地利用/覆被变化



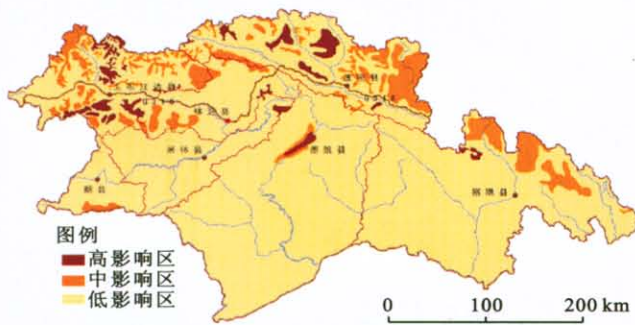
附图8 南四湖地表覆被和土地利用分类



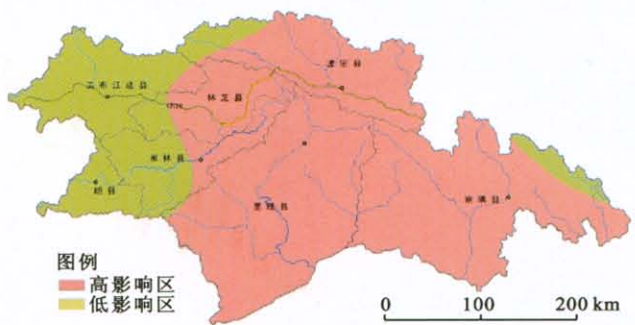
附图9 地质环境因子对西藏林芝地区泥石流易发区影响分区



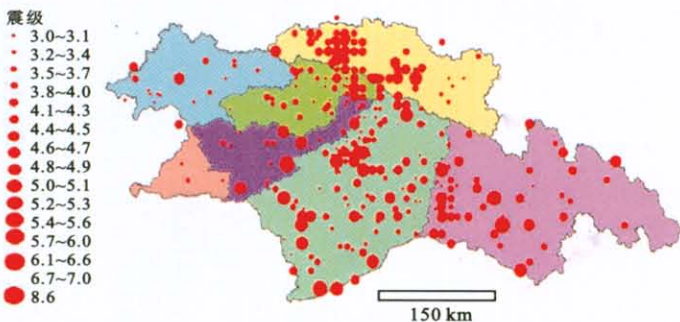
附图10 地貌因子对西藏林芝地区泥石流易发区影响分区



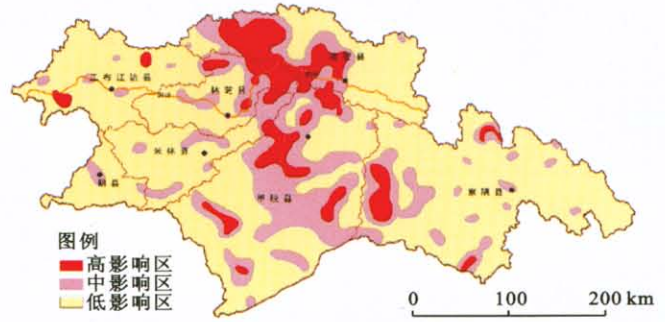
附图11 冰川活动因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区



附图12 气候因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区



附图13 1950年以来西藏林芝地区地震分布状况



附图14 地震因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区