

滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系*

孙金华¹, 曹晓峰², 黄 艺^{1**}

(1: 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

(2: 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054)

摘要: 湖泊水质与人类活动有着密切的关系, 人类活动是湖泊水质恶化的驱动因素. 本文在分析 1999—2009 年滇池水质时空变化特征的基础上, 以受人类干扰的土地比例、城镇与湖岸的距离、人口密度、单位土地 GDP 作为陆地人类活动压力的表征指标, 通过对比分析研究滇池水质与人类活动的关系. 结果表明: 滇池的草海部分和外语部分水质差异显著, 草海水质整体较差且呈逐年下降趋势, 外语 NH₃-N、TN、TP 浓度明显低于草海, 且随时间的变化较小, 外语 COD_{Mn} 略低于草海, 年际变化与草海相似. 城镇用地比例、人口密度、单位土地 GDP 是草海与外语水质相差悬殊的主导因子; 草海汇水区城镇扩张、人口和 GDP 产值的飞速增长导致草海污染物浓度大幅增加, 而河流截污工程、农业农村面源污染的有效控制使外语 NH₃-N、TN、TP 上升不明显甚至有下降趋势.

关键词: 滇池; 水质时空特征; 人类活动; 土地利用; 人口密度; GDP

Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi

SUN Jinhua¹, CAO Xiaofeng² & HUANG Yi¹

(1: *College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China*)

(2: *College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China*)

Abstract: Lake water quality is closely related with human activities, and human activities are the driving factors in lake water quality aggravating. Analyzing the spatial-temporal trend of Lake Dianchi in recent ten years, taking proportion of interrupted land-use by human beings, population density, and GDP per square kilometer as human activity indicators, this paper investigated the relationships between lake water quality and human activities in Lake Dianchi watershed. Firstly, as Lake Dianchi is divided into two parts, Lake Caohai is greatly different from Lake Waihai in terms of water quality. Lake Caohai was polluted seriously and getting worse year by year, while the concentrations of NH₃-N, TN and TP in Lake Waihai were much lower than those in Lake Caohai, and changed slightly in past ten years. The concentration level of COD_{Mn} in Lake Waihai and its changing situation in past ten years was similar to those of Lake Caohai. Secondly, town construction landuse, population density, and GDP per square kilometer were leading factors in causing the differences between Lake Caohai and Lake Waihai. Meanwhile, city and town expanding, and population and GDP growing led to Lake Caohai polluted seriously, while Lake Waihai was less polluted or sometimes, even better (such as TP), perhaps because of non-point pollution control from agriculture and rural area, or the pollution-cutting-engineering at some inflow rivers' watershed.

Keywords: Lake Dianchi; spatial-temporal trends of water quality; human activities; land-use; population density; GDP

湖泊作为一种重要的自然资源, 具有蓄水、供水、养殖、航运和旅游等多项生态功能, 在区域经济社会可持续发展中起着重要作用. 近 20~30 a 我国一些重要湖泊水质都出现了急剧恶化的态势^[1-4], 而同期这些湖泊流域的水文、气象等条件并没有发生特别异常的变化. 因此, 湖泊水质的急剧恶化是人类活动方式和强度的变化

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2008ZX07526-002-06)资助. 2011-06-25 收稿; 2011-12-13 收修稿. 孙金华, 女, 1980 年生, 博士; E-mail: sunjinhua2004@126.com.

** 通信作者; E-mail: yhuang@pku.edu.cn.

所引起^[5-7],人类活动产生的工业废水、生活污水、农田以及畜牧养殖排水是湖泊水体污染的主要来源。

滇池是富营养化严重的国家重点治理的三湖之一,国家在滇池保护治理方面投入了大量的人力物力财力,实施了滇池流域水污染防治的三个“五年”计划,颁布了《滇池保护条例》,且工作力度不断加大,对滇池的水质的急剧恶化起到了控制作用^[8-10],但是从总体上看水质还是呈现下降趋势^[11-14],尤其是滇池的草海部分.对滇池水质下降原因及人类活动的影响已开展了大量的研究工作,有基于水循环和水污染过程的定性分析^[14-18],也有对滇池整个流域的污染负荷、土地利用、社会经济随时间变化的定量分析^[14,19-22],而针对湖体水质的空间差异的影响因子定量分析相对较少.本文采取空间和时间相结合的方法,在分析近 10 a 滇池水质随时间变化和空间变化的基础上,量化人类活动影响因子指标,根据水质发生空间变化的湖体方位,通过合并入湖河流汇水区来划分陆地区域,分析人类活动对滇池水质时空变化的影响。

1 研究区概况

滇池(24°40′~25°02′N,102°36′~102°47′E)属长江流域金沙江水系,位于昆明市西南,属断陷构造湖泊,是云贵高原最大的淡水湖泊.滇池南北长约 40.4 km,东西平均宽约 7 km,水面面积为 309.5 km².滇池水域自 1996 年修建了船闸以后就被分割为既相互联系,但又几乎互不交换的草海(内海)、外海两部分.草海位于滇池北部,平均水深 2.5 m,面积 10.8 km²约占全湖的 3.6%;外海为滇池的主体,平均水深 10.8 m,面积 298.8 km²,约占全湖面积的 96.4%.草海、外海各有一人工控制出口,向北经螳螂川、普渡河后,汇入金沙江.滇池入湖河流为 29 条,属 12 个水系,除流经昆明市区的 6 条纳污河,其它都发源于流域北部、东部和南部的山地,以及滇池上游的水库和龙潭等水源地,其中 7 条河流流入草海,22 条河流流入外海,这些入湖河流流经人口密集的城镇、乡村以及磷矿区,最后呈向心状注入滇池^[23].

2 研究方法 & 数据

基于 1999—2009 年的近 10 a 水质数据,分析滇池水质随时间和空间变化的规律和特征,定位水质存在明显差异的时间节点和空间方位,划分水质存在差异的不同水域所对应的陆地汇水区,选择适于进行时间变化分析的年份.以受人类干扰的土地(城镇、农村建设用地、耕地)比例、城镇与湖岸的距离、人口密度、单位土地 GDP 作为反映人类活动的量化指标.对水质存在明显差异的不同水域,分析在同一年份其对应的汇水区的人类活动因子差异.对水质随时间变化明显的同一水域,分析在不同年份其对应的汇水区人类活动因子的变化及对水质的影响。

在滇池湖面均匀布设监测点 10 个(图 1),每月监测一次水质.根据近年来水质监测显示的污染物情况,确定选用高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)作为本文水质分析的指标。

所有水质数据均来自于昆明市环境监测中心.乡镇人口和 GDP 数据部分来源于云南省政府工程的“数字乡村”项目,部分来源于国家统计局农村司.土地利用数据则是基于 2008 年 7 月 Landsat 遥感影像(空间分辨率为 30 m),用 1:50000 的地形图为准进行地理坐标配准,结



图 1 滇池水质监测点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites of Lake Dianchi

合野外调查利用 ERDAS Imagine 遥感处理软件进行图像的解译和分类,从而获得流域内的土地利用类型数据.参照 1984 年的《全国土地利用现状调查技术规程》的土地分类体系,将滇池流域土地类型分为 7 个一级类:耕地、林地、草地、居民点及工矿用地、交通用地、水域、未利用土地.考虑到城镇、农村对湖泊水质的影响差别较大,本文将居民点及工矿用地再分为城镇用地、农村建设用地(由于 TM 数据分辨率所限,工矿用地未单独区分出).

3 滇池水质时空特征

3.1 空间变化特征

滇池水质的空间差异主要表现在草海和海外 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 浓度的差异,草海比外海高出 5 ~ 50 倍,草海与外海的 COD_{Mn} 差异不大.对于草海而言,北部 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 浓度高于南部,而外海的南北差异极小,从 8 个监测样点看,只有位于最北部的 b1 略高, b2 ~ b8 几乎没有差别(图 2).这是因为草海水体流速非常小,污染物扩散慢,河流来水从北部入湖,入湖河流的污染物浓度比草海自身的浓度高,因此出现北高南低的现象;而外海水体流速大,污染物扩散快,使得不同方向河流来水很快融在一起,因此未表现出空间差异.

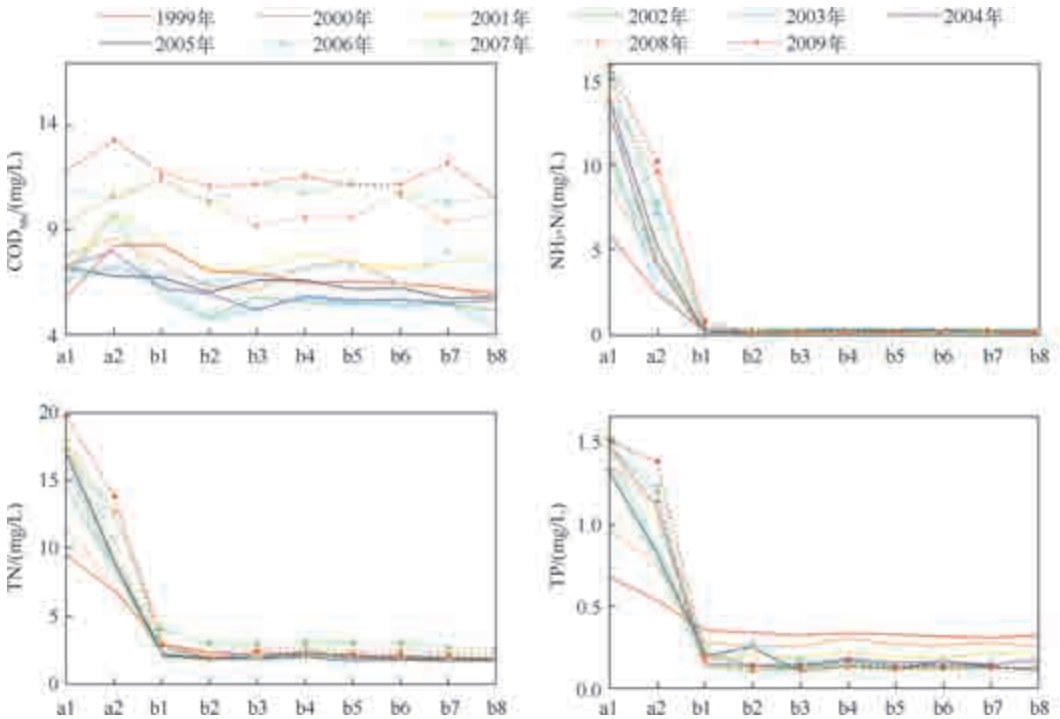


图 2 滇池 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的空间变化

Fig. 2 Spatial changes of COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, TP in Lake Dianchi

3.2 年际变化特征

由于草海内部和外海各自的污染物浓度空间差异很小,本文用草海样点(a1, a2)和外海样点(b1 ~ b8)的平均值反映污染物的年际变化特征(图 3).对于草海,水质总体呈明显的下降趋势,1999—2006 年 COD_{Mn} 在 6.0 ~ 8.5 mg/L 之间波动,2007—2009 年上升到 11.0 ~ 13.0 mg/L,为地表水环境标准中的 V 类水平; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 浓度逐年上升且升高幅度较大, $\text{NH}_3\text{-N}$ 从 1999 年的 4.2 mg/L 上升到 2009 年的 13.0 mg/L (超出 V 类水标准 5 倍), TN 从 1999 年的 8.2 mg/L 上升到 16.8 mg/L (超 V 类水标准 7 倍), TP 从 1999 年的 0.6 mg/L 上升到 1.4 mg/L (超出 V 类水标准 6 倍).对于外海, COD_{Mn} 变化趋势与草海相同,浓度略低于

草海; $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 浓度远低于草海, 且在 10 a 间变化幅度很小, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 0.18 ~ 0.31 mg/L (II ~ III 类); TN 浓度为 1.9 ~ 3.0 mg/L (处在 V 类左右), 在 2007 年浓度最高. TP 浓度呈下降趋势, 1999 年为 0.33 mg/L (劣 V 类), 2003—2009 年保持在 0.13 ~ 0.18 mg/L (V 类).

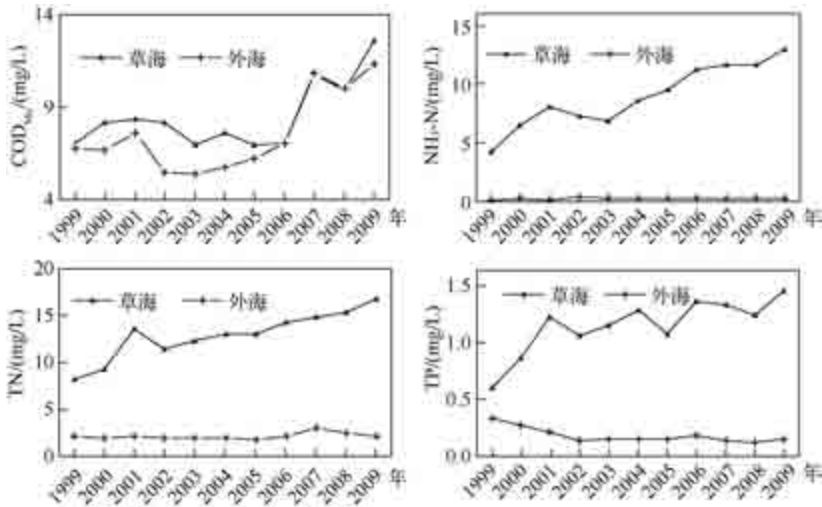


图3 草海和外海的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 年际变化(1999—2009 年)

Fig. 3 Annual changes of COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP in Lake Caohai and Lake Waihai from 1999 to 2009

3.3 季节变化特征

滇池流域降水季节性分明: 2—5 月为枯水期, 6—9 月为丰水期, 10 月至次年 1 月为平水期. 1999—2009 年, 滇池草海 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 TN 浓度随季节变化的规律为枯水期 > 平水期 > 丰水期. 可见滇池污染物浓度与自然降水量有关, 自然来水量越大, 水体污染物浓度越低, 外海的季节变化不明显. 图 4 以 2007 年为例说明滇池水污染指标随季节变化的规律.

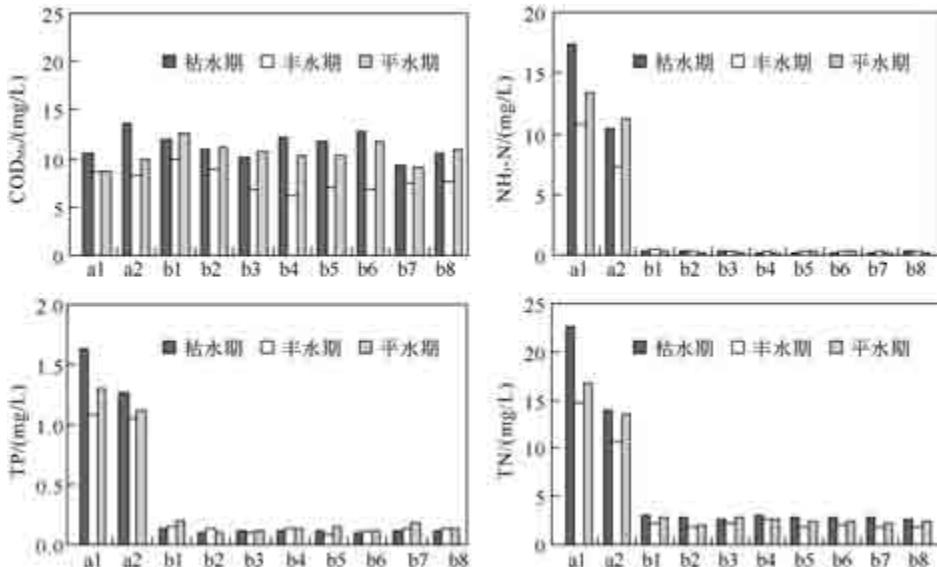


图4 2007 年滇池 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 TP 的季节性变化

Fig. 4 Seasonal changes of COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP with rainfall seasons in Lake Dianchi in 2007

4 影响水质时空特征的人类活动因子分析

出入滇池的主要河流为 29 条,其中 7 条入草海、21 条入外海,1 条为出湖河流。基于流域生态学的水文完整性理论,以水系分布矢量数据和 1:100000 DEM 栅格数据为基础,利用 ArcGIS 的 Hydrology 模块将陆地划分为 12 个集水区,分别合并入草海、外海河流的集水区,流域陆地被分为三个部分(R1、R2、R3):R1 为入草海河流的汇水区(占流域陆地总面积的 5%);R2 为入外海河流的汇水区(占 91%),R3 为出湖河流的陆地区域(占 4%)(图 5)。

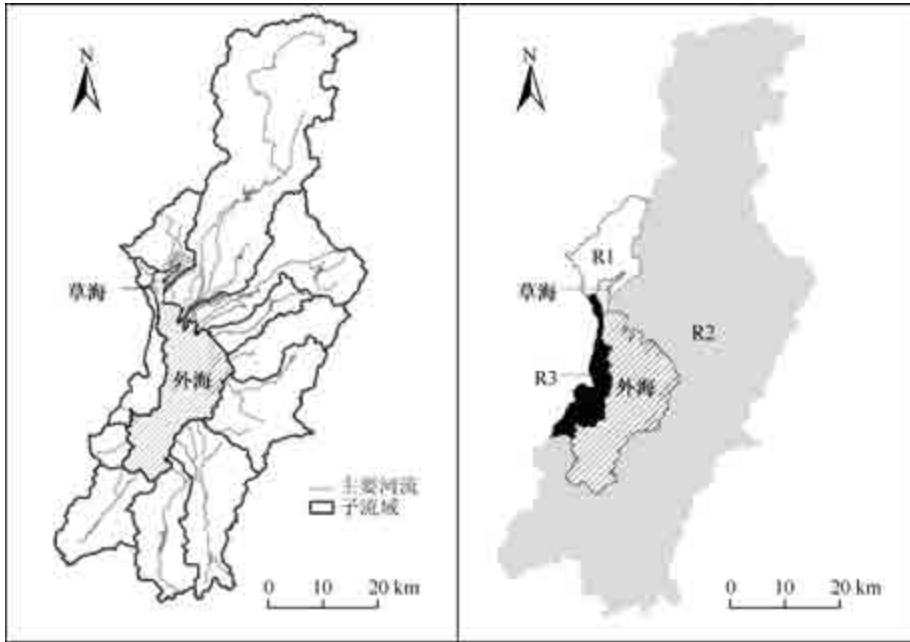


图 5 子流域划分、草海-外海汇水区

Fig.5 Watershed and drainage area of Lake Caohai and Lake Waihai

针对草海和外海水质的空间差异,对比同一年份入草海河流和入外海河流所在汇水区 R1 和 R2 的人类活动因子差异。针对水质的年际变化特征,对比汇水区 R1 和 R2 在水质较好的 2000 年和较差的 2007 年的人类活动因子差异。通过对比分析滇池水质时空差异与人类活动因子的关系。

4.1 人类活动因子的指标值计算

土地是人类活动和水体产生关联的媒介,本研究将受人类活动干扰的土地类型比例、人口密度、单位土地 GDP 作为体现人类活动方式和强度对湖泊水质影响的量化指标。

林地、耕地、城镇用地、农村建设用地、草地为主导的土地类型空间分布特征为:耕地环绕于滇池外海的东部、南部和北部,林地分布在流域四周,城镇用地位于滇池北部,农村建设用地散落与耕地之间。土地利用随时间变化的特征为:城镇用地和耕地面积增加,草地面积减少,以及外海北部城镇用地与湖岸的距离缩小(图 6)。滇池流域人口和 GDP 的空间分布特征:绝大多数人口和 GDP 分布在滇池北部,占整个区域的 80% 以上(图 7)。

将乡镇区划 GIS 矢量图和流域汇水区 GIS 区划图叠加,得到汇水区 R1 和 R2 内所包含的乡镇,从而计算汇水区内的人口总数和 GDP(注:对于同时跨两个汇水区的乡镇,根据被分割的乡镇面积比例来估算落入 R1 和 R2 的人口和 GDP)。同样,将土地利用矢量图和汇水区区划图叠加,则可以计算落入 R1 和 R2 内的各种土地利用类型的面积和。以上矢量数据的叠加运算通过 ArcGIS 的空间分析模块来实现。汇水区 R1 和 R2 的城镇用地比例、耕地比例、农村建设用地比例、城镇与湖岸距离、人口密度、单位土地 GDP 计算结果见表 1。

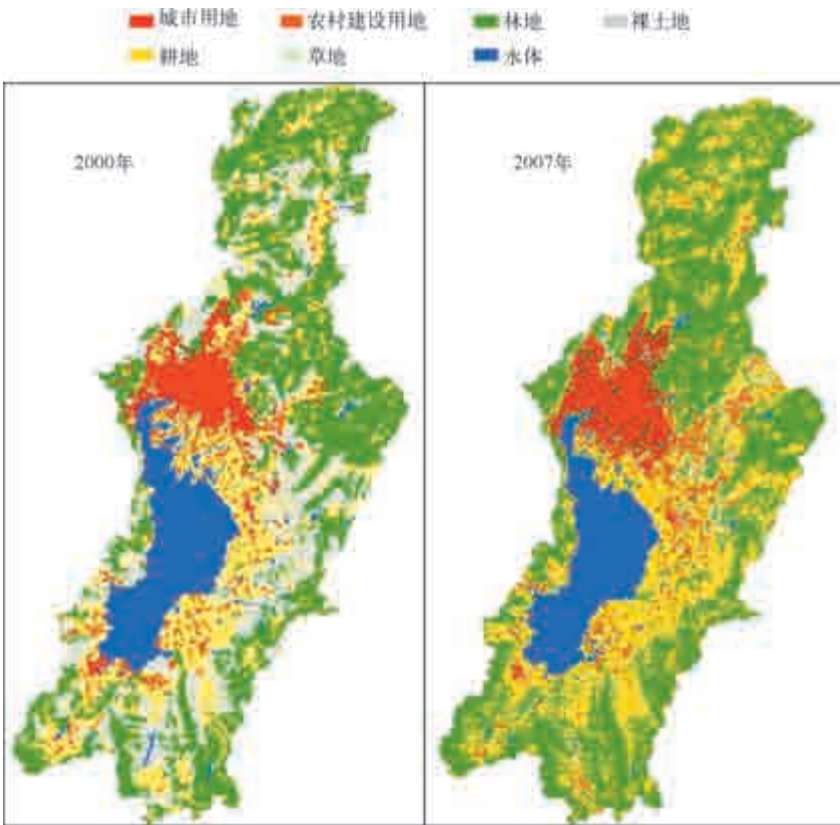


图6 滇池流域2000、2007年土地利用分布
Fig. 6 Landuse distribution of Dianchi Basin in 2000 and 2007

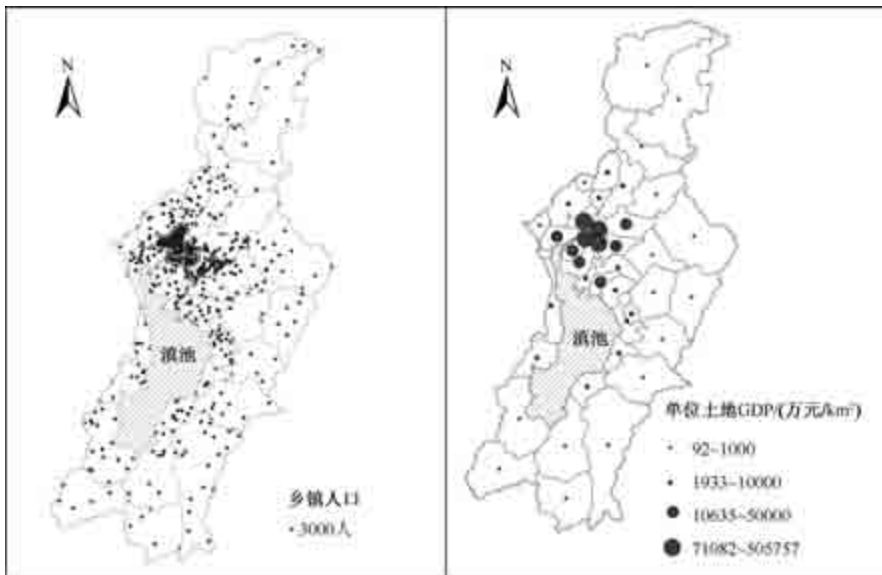


图7 2007年滇池流域乡镇人口、GDP分布
Fig. 7 Distribution of population density and GDP per square kilometers based on town or subdistrict area in Dianchi Basin in 2007

表 1 2000、2007 年草海和海外汇水区 (R1、R2) 人类活动因子指标值

Tab. 1 Indicator of human activities in drainage area (R1 and R2) in 2000 and 2007

年份	汇水区	城镇用地比例	耕地比例	农村建设用地比例	城镇与湖岸距离/km	人口密度/(人/km ²)	单位土地 GDP/(万元/km ²)
2000 年	R1	0.35	0.15	0.04	0~1	3903	3031
	R2	0.04	0.30	0.05	5~9	708	986
2007 年	R1	0.38	0.08	0.05	0~1	5774	22158
	R2	0.05	0.35	0.06	3~6	903	3859

4.2 基于空间差异的人类活动因子分析

2007 年草海汇水区 (R1) 的城镇用地为外海汇水区 (R2) 的 7 倍, 耕地 R1 为 R2 的 1/4, 农村建设用地比例相当, R1 的人口密度、单位土地 GDP 均为 R2 的 6 倍左右, 城镇与湖岸的距离 R1 比 R2 近. 2000 年和 2007 年非常相似, R1 与 R2 相比, 受人类活动干扰的土地比例、人口密度、单位土地 GDP 的差别悬殊 (表 1). 草海 NH₃-N、TN、TP 的浓度远高于外海 (图 2), 这说明城镇用地比例、人口密度、单位土地 GDP 是 NH₃-N、TN、TP 差异的影响因素, 城镇工业生产、居民生活的氮磷贡献要远大于农业农村面源污染; 而草海 COD_{Mn} 水平在 1999—2006 年略高于外海, 2006—2009 年二者水平相当, 农业农村面源污染对滇池 COD_{Mn} 的影响亦较大, 且呈现明显的污染增长趋势.

4.3 基于时间差异的人类活动因子分析

对草海汇水区 R1, 2007 年比 2000 年城镇用地增加 3%, 农村建设用地增加 1%, 耕地减少 7%, 城镇与湖岸的距离没有变化, 人口密度增加了 48%, 单位土地 GDP 则增加了 600% (表 1). 通过水质时间变化分析发现, COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP 浓度均呈明显的上升态势, 这说明随着城镇扩张, 人口和 GDP 快速增长带来更多的生活污水和工业废水, 使治理速度赶不上污染速度, 导致草海污染物浓度大幅增加, 因此人口和经济的急剧增长是草海水质下降的根本驱动力, 这与何佳等^[21]和郑丙辉等^[22]的研究结果相一致.

对于外海汇水区 (R2), 2007 年比 2000 年城镇用地增加 1%, 城镇与湖岸的距离缩小 2 km, 农村建设用地增加 1%, 耕地增加 6%, 人口密度增加了 28%, 单位土地 GDP 则增加了 270%. 城镇用地比例、人口、GDP 的增长会对外海污染物浓度的升高有一定的贡献, 由于涨幅较 R1 小, 影响程度自然远小于草海. 外海 TN 浓度随时间推移略有升高, NH₃-N 几乎没有变化 (图 3), 一方面由于该区部分河流污染治理工程 (如盘龙江北岸截污工程) 的作用, 此外, 农业农村面源污染治理降低了污染物排放基数, R2 的耕地比例大, 因此效果明显, 使外海 TN 升高幅度较小, TP 浓度甚至出现了下降. COD_{Mn} 升高非常明显, 这说明一些农村企业用地和居民地是 COD_{Mn} 的贡献者, 且治理和控制力度还不够.

4.4 讨论

1) 草海水质的季节差异较为明显, COD_{Mn}、TP、TN、NH₃-N 浓度丰水期低, 枯水期高 (图 5). 这是因为城镇用地的下垫面条件决定其径流系数高, 在丰水期产水量大, 入湖水量增大, 使污染物浓度降低, 而耕地渗透能力强, 其产水量对降水的增加不敏感. 草海汇水区 (R1) 的城镇用地比例高, 因此草海在丰水期污染物浓度偏低现象明显, 而外海汇水区 (R2) 的城镇用地比例非常低, 其产水量的增减不明显, 因此其污染物浓度的季节差异性不明显.

2) 既然丰水期、枯水期的降水量会对草海水质产生影响, 那么不同年份的年降雨量差异也会产生一定的影响, 丰水年产水量大, 则会降低草海的污染物浓度. 2000 年、2007 年都是平水年, 年降水量分别为 886.3、932.7 mm^[24-25], 2007 年的降水量略大于 2000 年, 降雨条件本身有利于污染物浓度的降低, 而草海的污染物浓度总体是升高的, 这说明草海 2007 年水质比 2000 年差, 主要是受人类活动的影响.

3) 人类活动是引起草海、外海水质差异的社会因素, 而入湖河流多少、水环境容量大小等自然因素亦是影响二者水质差异的重要因素. 外海面积是草海的 26 倍, 平均水深为草海的 4 倍左右, 因此容量远远大于草海; 此外, 外海的出入湖河流多 (外海 21 条河流, 草海仅有 7 条), 因此外海入湖通量远大于草海, 以 2009 年为例, 外海入湖通量为 $6.11 \times 10^8 \text{ m}^3$, 草海为 $1.03 \times 10^8 \text{ m}^3$. 本文仅对与社会人类活动有关的因素与水质特征进行对应分析, 而结合其它自然因素的综合分析将在今后作进一步的研究.

5 结论与展望

1999—2009年,草海水质较差且总体呈下降趋势:COD_{Mn}从2007年前的地表水环境质量标准Ⅳ类下降到Ⅴ类,NH₃-N、TN、TP浓度从1999年超过Ⅴ类水标准的1~2倍,到2009年超过Ⅴ类水标准6~10倍.外海的COD_{Mn}水平比草海略低、变化趋势和草海相似,而NH₃-N、TN、TP远低于草海且随时间变化较小,NH₃-N浓度保持在Ⅱ类水平,TN则基本处于Ⅴ类水平,TP浓度从2003年开始呈现小幅下降,从之前的劣Ⅴ类变为Ⅴ类水标准.滇池水质的空间差异显著,表现在北部草海NH₃-N、TP、TN浓度比南部外海高出5~50倍;草海COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN季节变化明显,丰水期浓度比枯水期浓度低.

城镇用地、人口密度、单位土地GDP是影响草海和外海NH₃-N、TN、TP空间差异的主导因子,而耕地、农村建设用地贡献较小;草海汇水区城镇扩张,人口和GDP快速增长,使污染治理的速度低于污染增加的速度,导致草海污染物浓度大幅增加;外海的NH₃-N、TN、TP上升不明显甚至有下降趋势,其原因为外海汇水区人口和经济增长相对缓慢,农业农村面源污染的有效控制,抵消了人口和经济增长带来的污染贡献.此外,农村工矿企业以及居民地也是COD_{Mn}的主要输出源,其贡献度不亚于城镇用地,因此草海和外海的COD_{Mn}水平没有明显差异.

GDP总值能够体现人类活动程度的强弱,通常GDP产值越高的区域,社会经济越发达,对水质的压力和干扰越强.如果数据资料充足,能够将不同产业分开,关注和水污染密切相关的工业GDP、农业GDP的变化,将能反映具体产业对滇池水质的影响,这将在今后作进一步研究.

6 参考文献

- [1] 刘连成. 中国湖泊富营养化的现状分析. 灾害学, 1997, 12(3): 61-65.
- [2] 梅亚东, 冯尚友. 中国水环境污染现状变化趋势防治对策. 自然资源, 1992, (4): 48-54.
- [3] 杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- [4] 钱凯先. 国内外湖泊富营养化研究及对策. 环境科学, 1988, 9(2): 59-63.
- [5] 于洋, 张民, 钱善勤等. 云贵高原湖泊水质现状及演变. 湖泊科学, 2010, 22(6): 820-828.
- [6] 郭青海, 马克明, 张易. 城市土地利用异质性对湖泊水质的影响. 生态学报, 2009, 29(2): 776-787.
- [7] 张海荣. 近50年来人类活动与艾溪湖富营养化过程关系研究[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2007.
- [8] 余冬, 赵世民, 李发荣. 昆明城市污水处理现状及对治理滇池的影响分析. 环境科学导刊, 2008, 27(6): 47-48.
- [9] 杨崇勇. 抓住机遇扎实工作大力推进滇池污染治理. 环境保护, 2007, (11A): 71-73.
- [10] 杨健强. 滇池污染的治理和生态保护. 水利学报, 2001, (5): 20-22.
- [11] 方涛, 敖鸿毅, 刘剑彤等. 滇池水体理化环境状况时空分布格局研究. 水生生物学报, 2004, 28(2): 124-130.
- [12] Xing KX, Guo HC, Sun YF *et al.* Assessment of spatial-temporal eutrophic character in the Lake Dianchi. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 37-43.
- [13] 苏涛. “十一五”期间滇池水质变化及原因. 环境科学导刊, 2011, 30(5): 33-36.
- [14] 王红梅, 陈燕. 滇池近20a富营养化变化趋势及原因分析. 环境科学导刊, 2009, 28(3): 57-60.
- [15] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500-506.
- [16] 刘丽萍. 滇池富营养化治理成效及其思考. 重庆环境科学, 2001, 23(5): 24-26.
- [17] 袁国林, 贺彬. 滇池流域地理特征对滇池水污染的影响研究. 环境科学导刊, 2008, 27(5): 21-23.
- [18] 吴德玲, 钱彪, 何琳晖. 滇池富营养化成因分析. 环境科学研究, 1992, 5(5): 25-28.
- [19] 潘珉, 高路. 滇池流域社会经济发展对滇池水质变化的影响. 中国工程科学, 2010, 12(6): 117-122.
- [20] 徐晓梅, 张珉玲. 影响滇池入湖污染物总量变化的主要因素分析. 云南环境科学, 2004, 23(4): 42-44.
- [21] 何佳, 徐晓梅, 陈云波. 滇池流域点源污染负荷总量变化趋势及原因分析. 中国工程科学, 2010, 12(6): 75-78.
- [22] 郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东等. 滇池流域生态环境动态变化研究. 环境科学研究, 2002, 15(2): 16-18.
- [23] 昆明市水利局水利志编写小组. 滇池水利志. 昆明: 云南人民出版社, 1996.
- [24] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴2008. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [25] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴2001. 北京: 中国统计出版社, 2001.