

洱海 10 条入湖河流缓冲带三圈内氮含量沿程变化

卢少勇^{1*}, 张闻涛^{1,2}, 邢 奕² (1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊环境研究中心, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 湖泊工程技术中心, 北京 100012; 2. 北京科技大学, 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 2013 年 7 月采集了 10 条洱海入湖河流缓冲带三圈(外圈、内圈、中圈)内沿程 34 个断面的表层水样, 测定了水样中总氮、可溶性总氮和氨氮的含量, 分析其空间分布特征。结果表明, 缓冲带内 3 个采样点的水质变化规律有 9 种类型: 连续升高型, 连续降低型, 先降低后升高的“V”字型, 先升高后降低的倒“V”字型, 平稳型, 先升高后平稳型, 先下降后平稳型, 先平稳后降低型, 先平稳后升高型, 10 条洱海入湖河流水体 $\rho(\text{TN})$ 较高, 平均值为 2.93mg/L, 特别是内圈入湖河口处 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 3.74mg/L, 对洱海威胁较大, 应加大河道治理, 完善缓冲带内圈村落管网收集系统和垃圾处理设施。其中, 茫涌溪、黑龙溪和清碧溪流域缓冲带 $\rho(\text{DTN})$ 为 0.30~2.31mg/L, 占 TN 比例的平均值为 81%, 中圈水体中氮负荷明显较内圈和外圈的高, 应通过测土平衡施肥以及有机肥增施来降低化肥使用量, 减少农田污染物随径流流失。考虑入湖河流水质上游普遍较好, 中游开始恶化, 建议在缓冲带外圈建设生态砾石床、生态塘和地下渗透池等生态截蓄净化工程。

关键词: 洱海; 缓冲带; 入湖河流; 氮

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)05-1561-07

Nitrogen evolution with distance of 10 inflow rivers in the three circles of buffer zone around Erhai Lake. LU Shao-yong^{1*}, ZHANG Wen-tao^{1,2}, XING Yi² (1. Engineering and Technology Center of Lake, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu, Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2016,36(5): 1561~1567

Abstract: Surface water of 34 monitoring sections in 10 inflow rivers, which were located at the 3 ribbon sections (inner, outer and middle) of the buffer zone of Erhai Lake, was sampled in July 2013. The water quality including total nitrogen, dissolved total nitrogen and ammonia nitrogen was measured and the spatial variabilities of selected water quality parameters were analyzed, aiming at put forward reasonable suggestions for the lack of function and establishment and improvement of the buffer zone. The results showed that there were 9 categories of the variation of water quality in ribbon sections, i.e., rise continuously, reduce continuously, first reduce then rise emerge “V” shape, first rise then reduce emerge inverted “V” shape, gently, first rise then steady, first reduce then steady, first keep gently then reduce, first keep gently then rise. The average $\rho(\text{TN})$ in 10 inflow rivers of Erhai Lake was 2.93mg/L. The average $\rho(\text{TN})$ of estuary in the inner ribbon section was 3.74mg/L, which was a threat to the lake. So improving the collection network of sewage and garbage disposal facilities was very important in the inner ribbon section. At the same time, management strengthen of rivers should be made. $\rho(\text{DTN})$ of Mangyongxi River, Heilongxi River and Qingbixi River in the buffer zone were changed between 0.30mg/L and 2.31mg/L, occupying 81% of $\rho(\text{TN})$ averagely. The nitrogen load of the 3 rivers in the middle ribbon section in the buffer zone was obviously higher than that in the inner and outer parts. Therefore, the use of

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-002, 2013ZX07101-014), 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012-YSKY-14)

* 责任作者, 研究员, lushy2000@163.com

fertilizer in the farmland should be controlled so that reducing nitrogen losses with the runoff. Ecological gravel bed, ecological pond and underground infiltration pond and other ecological purification engineering measures should be built in the outer ribbon section, considering the water quality began to deteriorate from the middle reaches.

Key words: Erhai Lake; buffer zone; inflow rivers; nitrogen

缓冲带作为保护区域位于湖泊外围,用以减少上游面源污染对湖泊的影响^[1-4].入湖河流是陆地生态系统和湖泊生态系统进行物质交换的通道,其通过接纳大量的生活污水、工业废水和农业余水,已成为湖泊富营养化的驱动力^[5].

洱海是云南省第二大高原湖泊,正处于由中营养向富营养状态转变阶段^[6].根据《云南洱海绿色流域建设与水污染防治规划》,洱海缓冲带总面积约 94km²,其下边界为洱海最高水位 1966.00m,从下边界线向陆地扩展,划分为 3 个圈层:内圈为洱海最高水位线以上 100m 环湖带,外圈为大丽线近湖侧 30m 左右的截蓄净化带,中圈为外圈和内圈之间的绿色经济带.洱海入湖河流河道两侧大部分乡镇和村落在生产、生活的过程中产生的污染物直接入河,特别是北部和西部农田面积比例较大,施用大量化肥和农药,对洱海水质影响非常明显^[7].

目前针对洱海入湖河流的研究不多,翟玥^[8]监测了洱海流域北部入湖河流罗时江和永安江

从源头到入湖河口的水质,分析了河流污染特征.于超等^[7]分析了弥苴河上关镇江尾大桥到入湖河口下游河段氮、磷季节性变化特征.马连根^[9]监测了西部苍山十八溪出山口和入湖口的水质.较系统地对入湖河流在洱海缓冲带内农田、村落交界处的水质状况的研究尚未见报道.本研究主要对洱海 10 条入湖河流在缓冲带内的 34 个断面进行了水质监测,分析氮含量在缓冲带 3 圈内的空间分布特征,旨在为洱海缓冲带的构建与完善和功能缺失提出合理建议.

1 材料与方法

1.1 河流概况

考虑洱海北岸和西岸湖岸较缓,缓冲带相对较宽的特点,选择北部的永安江和西部的阳溪、茫涌溪、锦溪、灵泉溪、中和溪、白鹤溪、黑龙溪、清碧溪和莫残溪 10 条入湖河流为研究对象.参考 2008 年《大理市地表水资源调查报告》,各条河流基本情况见表 1 和图 1.

表 1 河流基本情况
Table 1 Descriptions of sampling rivers

序号	所在地	河流名称	类型	长度(km)	年均径流量(×10 ⁴ m ³ /a)	流域面积(km ²)	人口(人)	耕地(亩)
1	洱源	永安江	常年性河	18.35	3800	110.25	49500	20000
2	喜洲	阳溪	常年性河	6.34	4740	42.88	15871	10724
3	湾桥	茫涌溪	常年性河	5.77	3730	30.54	13624	9829
4		锦溪	常年性河	4.92	2390	15.1	3277	2680
5		灵泉溪	常年性河	4.53	2500	20.24	9847	7092
6	大理	中和溪	常年性河	6.68	600	10.02	21420	5382
7		白鹤溪	季节性河	5.69	660	13.54	22966	6555
8		黑龙溪	常年性河	6.00	1360	19.94	8927	5519
9		清碧溪	季节性河	5.29	1010	13.14	7900	4553
10	下关	莫残溪	常年性河	3.69	470	18.38	10463	6908

1.2 样点布设与采集

各条河流在洱海缓冲带 3 圈中每圈分别布

设 1~2 监测断面,共 34 个,见图 1.于 2013 年 7 月用有机玻璃采水器采集表层(0~0.5m)水样,储存

于聚乙烯瓶中低温保存,迅速运回洱海基地实验室,立即处理分析。

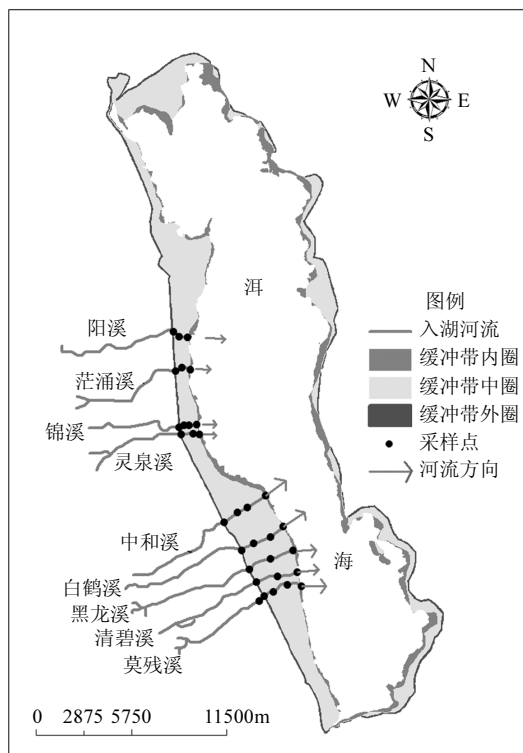


图 1 采样点位示意

Fig.1 Location of sampling sites

1.3 测试指标及方法

现场用意大利米克 MT106 测定仪测定 DO 和 pH 值。水质测试指标包括总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)。其中 $\rho(\text{TN})$ 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)测定; $\rho(\text{DTN})$ 经 $0.45\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)测定; $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 用纳氏试剂分光光度法(GB7479-87)测定。

1.4 数据处理

试验数据取各圈采样点指标数据平均值,并通过 SPSS 13.0 和 Origin 8.0 软件分析。

2 结果与讨论

河流水体中污染物浓度在缓冲带三圈内沿程变化大体可分为 9 种类型:连续升高型,连续降

低型,先降低后升高的“V”字型,先升高后降低的倒“V”字型,平稳型,先升高后平稳型,先下降后平稳型,先平稳后降低型,先平稳后升高型(如变幅 $\leq 10\%$,忽略其变化)。

2.1 水中总氮含量呈先平稳后上升型河流

阳溪、锦溪、灵泉溪和莫残溪水体中 $\rho(\text{TN})$ 在洱海缓冲带外圈、中圈和内圈的沿程变化呈先平稳后上升的变化趋势,见图 2。

阳溪 $\rho(\text{TN})$ 为 $1.80\sim 2.47\text{mg/L}$, 平均值 2.02mg/L ,属地表水劣 V 类(GB3838-2002)^[10]。 $\rho(\text{DTN})$ 为 $0.41\sim 1.33\text{mg/L}$,DTN 占 TN 的 $23\%\sim 54\%$ 。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 $0.17\sim 0.80\text{mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 TN 的比例从外圈的 26% 降低到中圈的 9% ,随后在内圈大幅升高到 32% 。锦溪 $\rho(\text{TN})$ 为 $2.16\sim 7.20\text{mg/L}$,平均值 3.89mg/L ,属地表水劣 V 类。 $\rho(\text{DTN})$ 为 $1.79\sim 7.11\text{mg/L}$,DTN 占 TN 的 $83\%\sim 99\%$ 。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 $0.14\sim 2.98\text{mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 TN 的比例从外圈的 6% 升高到中圈的 9% ,大幅升高到内圈的 41% 。灵泉溪 $\rho(\text{TN})$ 为 $0.88\sim 1.18\text{mg/L}$,平均值 1.00mg/L ,属地表水 III 类。 $\rho(\text{DTN})$ 为 $0.63\sim 0.95\text{mg/L}$,DTN 占 TN 的 $67\%\sim 89\%$ 。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 $0.10\sim 0.19\text{mg/L}$ 。莫残溪 $\rho(\text{TN})$ 为 $2.34\sim 3.74\text{mg/L}$,平均值 2.82mg/L ,属地表水劣 V 类。 $\rho(\text{DTN})$ 为 $1.78\sim 3.91\text{mg/L}$,DTN 占 TN 的 $80\%\sim 100\%$ 。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 $0.06\sim 0.38\text{mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 TN 的比例从外圈和中圈的 3% 大幅升至内圈的 10% 。

阳溪、锦溪、灵泉溪和莫残溪在缓冲带内圈河水中 $\rho(\text{TN})$ 高于外圈和中圈,且 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 TN 的比例在内圈变幅较大。因入湖河流缓冲带内圈段两岸有许多村落,各村落基本情况见表 2。村落人口众多,居民日常排水包括:厨房污水、冲厕水和洗涤污水,排水无序地汇入沟渠和河流^[11]。畜禽养殖以牛、猪为主,奶牛为当地特色产业,但畜禽粪便不能及时处理和有效利用,在岸边堆放,而粪便中氮淋溶性很强^[12],对河流水质的威胁较大。4 条河流水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 DTN 比例的平均值仅为 28% ,这与水体中溶解氧含量(DO)较高(7.52mg/L),利于硝化作用密不可分。

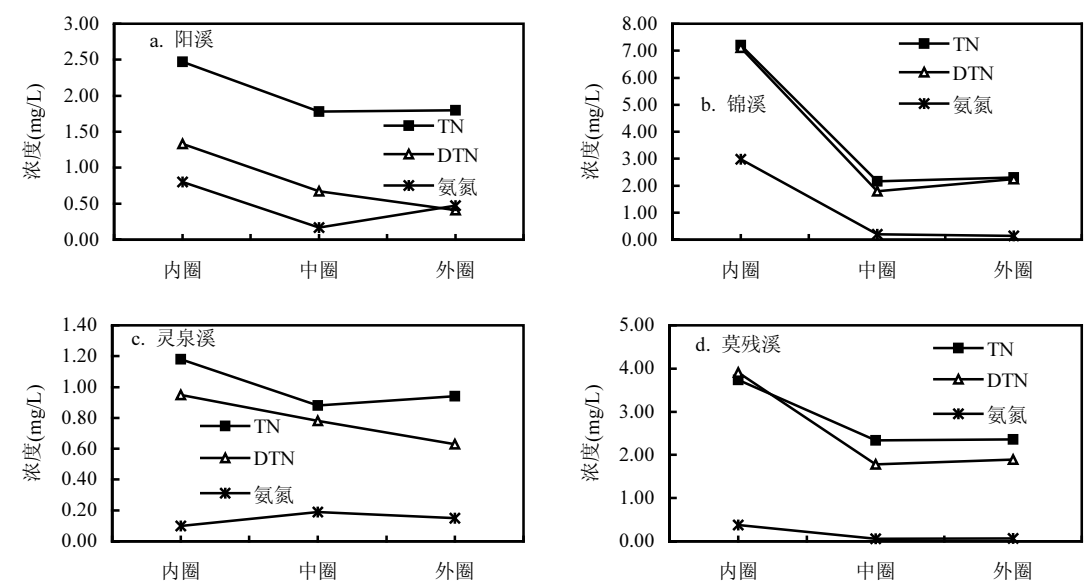


图2 总氮含量呈“先平稳后升高型”的河流

Fig.2 Content of total nitrogen of inflowing rivers emerge first keep gently then rise

表2 村落基本情况

Table 2 Descriptions of countries

河流	村落	总人口数 (人)	农业人口 数(人)	猪(头)	牛(头)
阳溪	向阳溪村	2664	2543	2600	460
锦溪	蟠溪村	3969	3789	0	0
莫残溪	大庄村	5420	4007	510	140

2.2 水中总氮含量呈平稳型河流

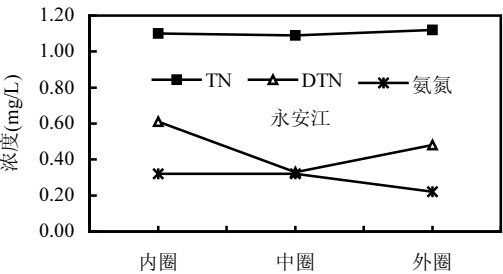


图3 总氮含量呈“平稳型”的河流

Fig.3 Content of total nitrogen of inflowing rivers keep gently

永安江从洱海缓冲带外圈流经中圈到内圈水体中 $\rho(\text{TN})$ 沿程变化不大(变幅 $\leq 10\%$),属平稳型,见图 3, $\rho(\text{TN})$ 为 1.09~1.12mg/L,平均值为

1.10mg/L,属地表水 IV 类, $\rho(\text{DTN})$ 为 0.33~0.61mg/L.因永安江属强侵蚀区,从缓冲带外圈到中圈虽 $\rho(\text{TN})$ 较平稳,但 DTN 占 TN 比例从 57% 增加到 70%,在缓冲带内圈河道中水生植物等的作用下,内圈 DTN 占 TN 比例有降低,占 TN 的 45%。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.22~0.32mg/L,水体 pH 值在 7.25~7.96 间变化,在微生物作用下,利于水体中含氮有机物转化成 $\text{NH}_3\text{-N}^{[13]}$,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 DTN 的比例从外圈的 47%增加到中圈的 96%.

2.3 水中总氮含量呈“V”字型河流

中和溪从洱海缓冲带外圈进入中圈再进入内圈最后入湖,水体中 $\rho(\text{TN})$ 沿程变化呈“V”字型,见图 4。 $\rho(\text{TN})$ 为 3.95~15.83mg/L,平均值 10.19mg/L,水质较差,显著($P<0.05$)高于永安江、阳溪、锦溪和灵泉溪的 $\rho(\text{TN})$ 平均值。 $\rho(\text{DTN})$ 为 3.64~15.30mg/L,DTN 占 TN 的 90%以上.河水中 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{DTN})$ 在中圈明显低于外圈和内圈.这与中和溪特殊地理位置有关,入缓冲带前,其上游来水通过了人口较密集的大理古城,在缓冲带内圈是旅游景区一才村码头.大理古城和才村码头沿岸商铺、餐饮店和客栈等较多,且未实现生活污水收集系统全覆盖,部分垃圾随意堆放,大量污

染物入河,致使氮含量较高^[14]. $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 2.16~12.76mg/L,从外圈到内圈先降后升, $\text{NH}_3\text{-N}$ 占 DNT 的 59%~83%,因中和溪水中溶解氧含量平均值仅为 3.44mg/L,pH 值为 7.29~7.51,属碱性范围,不利于硝化.

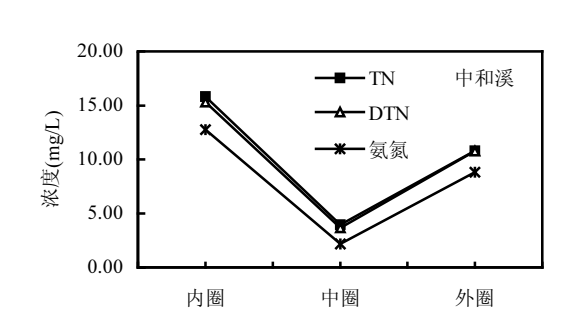


图 4 总氮含量呈“先降低后升高型”的河流
Fig.4 Content of total nitrogen of inflowing rivers emerge first reduce then rise

2.4 水中总氮含量呈倒“V”字型河流

茫涌溪、清碧溪和黑龙溪从洱海缓冲带外圈流经中圈到内圈 $\rho(\text{TN})$ 沿程变化呈倒“V”字型,见图 5.

茫涌溪 $\rho(\text{TN})$ 为 1.46~1.80mg/L 之间,平均值 1.58mg/L,属地表水 V 类. $\rho(\text{DTN})$ 为 1.38~1.54mg/L. $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.05~0.13mg/L.黑龙溪水体中 $\rho(\text{TN})$ 为 1.00~1.48mg/L 之间,平均值 1.19mg/L,属地表水 IV 类. $\rho(\text{DTN})$ 为 0.52~1.21mg/L之间. $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.15~0.20mg/L.清碧溪水体中 $\rho(\text{TN})$ 为 0.27~2.74mg/L,变幅较大,平均值 1.58mg/L,属地表水 V 类. $\rho(\text{DTN})$ 为 0.30~2.31mg/L. $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.08~0.38mg/L.

茫涌溪、黑龙溪和清碧溪中圈河段两岸分布大面积农田,主要作物有水稻、大蒜、蚕豆等作物.当地长期依赖化肥,有机肥 3150kg/hm²,尿素 375~450kg/hm²,磷肥 308kg/hm²,硫酸钾 58kg/hm²,其中氮肥利用率仅 25%~50%^[15].大量氮随农田退水和径流流失,进入河流,导致 $\rho(\text{TN})$ 从外圈到内圈呈先升高后降低的趋势.水体中 TN 以 DTN 为主,3 条河流水体中 DTN 占 TN 比例的平均值为 81%.其中清碧溪属于季节性河流,在 5~10 月份的雨季河水流流量加大,大部分泥沙进入

水体中,导致非溶解性总氮含量增大,因此 DTN 占 TN 比例从外圈到内圈呈降低的趋势.而黑龙溪 DTN 占 TN 比例呈升高的趋势,可能是部分非溶解性氮转化成可溶性态氮的缘故.

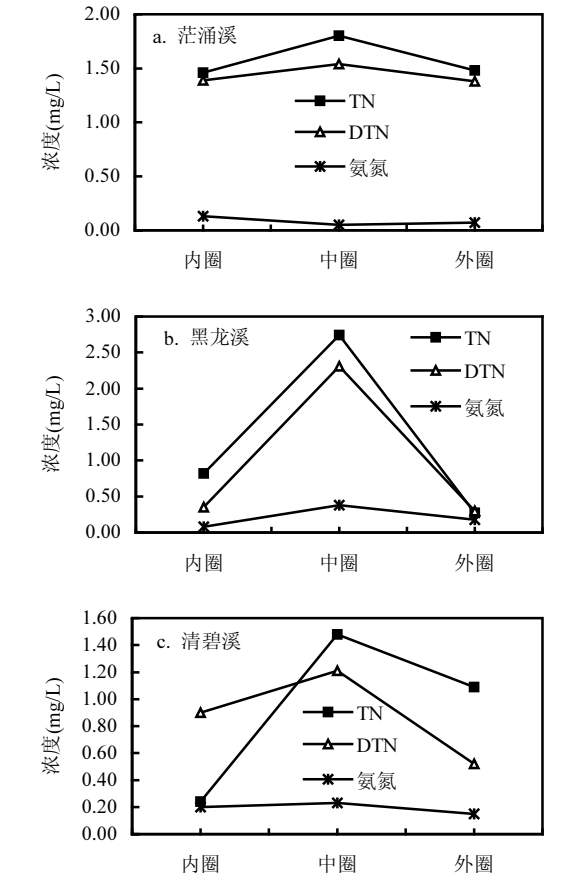


图 5 总氮含量呈“先升高后降低型”的河流
Fig.5 Content of total nitrogen of inflowing rivers emerge first rise then reduce

2.5 水中总氮含量呈连续升高型河流

总氮含量呈“连续升高型”的河流见图 6. 白鹤溪从洱海缓冲带外圈流经中圈到内圈 $\rho(\text{TN})$ 沿程呈连续升高的趋势. $\rho(\text{TN})$ 为 1.23~2.53mg/L,平均值 2.00mg/L,属地表水 V 类. $\rho(\text{DTN})$ 为 1.00~1.96mg/L. $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.15~0.31mg/L.白鹤溪缓冲带中圈段与黑龙溪和清碧溪的土地利用现状相似,但缓冲带内圈段是旅游景区—龙龕码头,周边餐饮服务较多,且大多无收集管网统一

收集,直排^[16].因此水体中 $\rho(\text{TN})$ 从中圈到内圈不但未降低,反而呈升高趋势.

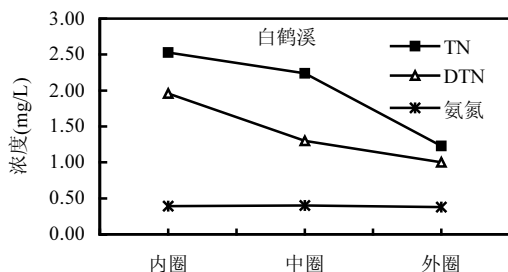


图6 总氮含量呈“连续升高型”的河流

Fig.6 Content of total nitrogen of inflowing river emerge rise continuously

2.6 讨论

入湖河流水质变化受多种外界因素的影响,如企业、居民生活、旅游产排污染物未经处理直排入河、畜禽与水产养殖污染、种植业面源污染、水土流失、干湿沉降及河流的不合理开发利用等都会导致河流水质下降^[17-18].通过入湖河流监测断面污染特征及变化趋势调查,分析存在的环境问题及其与污染物的响应,并提出相应对策和建议,是治理入湖河流的关键.

10 条河流内圈入湖河口处 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 3.74mg/L ,其中优于地表水 III 类(含 III 类)的溪流仅占所监测溪流的 20%,劣 V 类占所监测溪流的 50%,明显较洱海湖滨带和湖区水体的高^[19-20].河流外圈和中圈段河水 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 2.19mg/L ,内圈河口水域的污染有加重趋势.据入湖河流年均径流量,污染物 TN 入湖量约为 795t/a ,污染负荷对洱海水质影响较大^[21].洱海西部区阳溪、锦溪、灵泉溪、莫残溪、中和溪、茫涌溪、黑龙溪、清碧溪和白鹤溪 9 条入湖河流缓冲带内水体 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 2.92mg/L ,较北部区永安江 $\rho(\text{TN})$ 高,主要因西部乡镇村落和农田较密集^[22],给河流带来较大污染,严重影响河流水质,属重点治理区.西部区茫涌溪、黑龙溪和清碧溪在缓冲带中圈段两岸分布大面积农田.例如,茫涌流域缓冲带中圈耕地面积近 7056 亩,主要种植水稻、大蒜、大蔬菜等作物,按水稻施肥氮输入量($76.5\text{kg}/(\text{hm}\cdot\text{a})$)和大蒜施肥氮输入量($76.5\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$)平均

值 $76.5\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 计^[23],茫涌流域施肥氮输入量为 36.0t/a ,种植业污染 TN 入湖量为 40%(参考同类型云南高原湖泊抚仙湖缓冲带)^[24],该流域农田每年约有 14.4t TN 流失到河流和洱海,可见氮流失风险较大.茫涌溪、黑龙溪和清碧溪流域内的缓冲带中圈的农田面积大,污染物的流失较严重.在这些区域应充分实施测土平衡施肥、用生物肥代替化肥、降低化肥用量,提倡科学轮作模式,在农田和水体间建立草地过滤带等措施,减少污染物入水体的量.应加大入湖河流的污染防治力度,完善缓冲带内圈的村落管网收集和垃圾处理处置,禁止养殖牲畜,尤其要控制旅游景点(如才村码头、龙龕码头等)的无序发展带来的临湖污染负荷量增加较快,逐步恢复河流的生态结构和功能,提高其自净能力.10 条入湖河流中,阳溪、锦溪、灵泉溪、莫残溪、中和溪、茫涌溪、黑龙溪、清碧溪和白鹤溪属苍山十八溪.源头是苍山自然保护区,流经大理坝子,最后注入洱海,水质在上游普遍较好,中游开始恶化^[25].特别是入洱海缓冲带后,水质最差,外圈河段水体 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 2.34mg/L ,属地表水劣 V 类, $\rho(\text{DTN})$ 平均值为 1.96mg/L , $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 平均值为 1.06mg/L .给缓冲带带来了较大压力.因此应在缓冲带外圈建设生态砾石床、生态塘、地下渗透生态池等生态截蓄净化工程.

3 结论

3.1 入湖河流水中氮含量在缓冲带三圈内具有明显的空间分布特征,10 条洱海入湖河流缓冲带段内的河水水质的沿程变化规律有 9 种:连续升高型,连续降低型,先降低后升高的“V”字型,先升高后降低的倒“V”字型,平稳型,先升高后平稳型,先下降后平稳型,先平稳后降低型,先平稳后升高型.

3.2 河水的 $\rho(\text{TN})$ 较高,平均值为 2.93mg/L ,而内圈入湖河口处 $\rho(\text{TN})$ 的平均值为 3.74mg/L ,给洱海 II 类水的水质目标的保障带来较大的压力.

参考文献:

- [1] Buckley C, Hynes S, Meehan S. Supply of an ecosystem

- service—Farmers' willingness to adopt riparian buffer zones in agricultural catchments [J]. *Environmental Science & Policy*, 2012,24:101–109.
- [2] Zhao P, Xia B, Hu Y, et al. A spatial multi-criteria planning scheme for evaluating riparian buffer restoration priorities [J]. *Ecological Engineering*, 2013,54:155–164.
- [3] Johnson S R, Burchell M R, Evans R O, et al. Riparian buffer located in an upland landscape position does not enhance nitrate–nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2013,52: 252–261.
- [4] Dorioz J M, Wang D, Poulénard J, et al. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics—A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006,117(1):4–21.
- [5] 王书航,姜霞,金相灿.巢湖入湖河流分类及污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2011(10):2834–2839.
- [6] 焦立新,赵海超,王圣瑞,等.洱海水体氮磷时空分布及其对 $\rho(\text{Chla})$ 的影响 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(5):527–533.
- [7] 于超,储金字,白晓华,等.洱海入湖河流弥苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素 [J]. *生态学报*, 2011,31(23):119–126.
- [8] 翟玥.洱海流域入湖河流污染分析及人工湿地处理技术研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [9] 马根连.云南大理苍山十八溪水质监测评价 [J]. *人民长江*, 2012, 4(12):68–70.
- [10] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.2002. GB3838—2002 地表水环境质量标准 [S]. 北京:中国环境科学研究院.
- [11] 葛俊,胡小贞,庞燕,等.砾间接触氧化法对白鹤溪低污染水体的净化效果 [J]. *环境科学研究*, 2015,28(5):816–822.
- [12] 孙瑞敏.我国农村生活污水排水现状分析 [J]. *能源与环境*, 2010(5):33–34,42.
- [13] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理 [J]. *生态学报*, 2006,26(8):2670–2677.
- [14] 黄凯.洱源农村畜禽粪便氮磷流失规律及控制方案研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.
- [15] 杨建云.洱海湖区非点源污染与洱海水质恶化 [J]. *云南环境科学*, 2004,23(1):104–105,126.
- [16] 颜昌宙,金相灿,赵景柱,等.云南洱海的生态保护及可持续利用对策 [J]. *环境科学*, 2005,26(5):38–42.
- [17] 刘姝,孔繁翔,蔡元锋,等.巢湖四条入湖河流硝态氮污染来源的氮稳定同位素解析 [J]. *湖泊科学*, 2012,24(6):952–956.
- [18] 张伟.南四湖主要入湖河流水质分析与评价研究 [D]. 济南: 济南大学, 2011.
- [19] 大理州环境保护局.大理白族自治州 2013 年环境状况公报 [R]. 2014.
- [20] 尹延震,储昭升,赵明,等.洱海湖滨带水质的时空变化规律 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(7):1192–1196.
- [21] 王世岩,刘晓波,刘畅.洱海表层水体中氮素空间变异分析 [J]. *水资源保护*, 2010,26(6):37–41.
- [22] 李岱青.洱海流域生态区划研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2000.
- [23] 王哲,谢杰,方达,等.洱海北部 2 种典型种植制度下农田氮污染负荷研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013,29(5):625–629.
- [24] 王佳妮,施永生,邓晶晶.抚仙湖缓冲带污染负荷分析及治理方案 [J]. *环境保护科学*, 2013,39(4):61–65.
- [25] 石妍.大理苍山洱海国家级自然保护区专项规划(2011–2020) [D]. 昆明:西南林业大学, 2012.

作者简介: 卢少勇(1976–),男,湖南郴州人,研究员,博士,主要研究方向为湖泊水污染防治与水生生态修复.发表论文 140 余篇.