

基于 PSR 模型的滇池流域农村生活污水空间分布特征和控制研究

孔维琳¹, 饶维力², 王崇云^{1*}, 彭明春¹, 董磊¹, 杨莎¹, 罗婷¹, 李其阳¹

(1.云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091; 2.昆明市农业局, 昆明 650034)

摘要:农村生活污水已成为滇池水污染的主要原因之一, 准确掌握农村生活污水污染空间分布特征是污染治理的基本条件。基于农村面源污染普查数据, 分析滇池流域农村生活污水污染物排放量, 通过基于压力-状态-响应(PSR)模型的系统分析, 提出滇池流域农村生活污水的系统控制方案。结果表明, 生活污水污染物排放量大小为西山区>官渡区>晋宁县>呈贡县>盘龙区>五华区>嵩明县, 湖滨平原区>山地丘陵区; 采用 ArcGIS9.2 软件, 分析污染物空间分布特征和城市污水处理厂、集镇污水处理站纳污处理范围的空间关系, 提出分散式农村生活污水处理设施空间布局与建设方案。

关键词:滇池流域; 农村生活污水; 空间分布; 污水处理

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1393-11

Spatial Distribution of Rural Domestic Sewage and Its Control in the Dianchi Lake Basin by PSR Model, China

KONG Wei-lin¹, RAO Wei-li², WANG Chong-yun^{1*}, PENG Ming-chun¹, DONG Lei¹, YANG Sha¹, LUO Ting¹, LI Qi-yang¹

(1. Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Kunming Agriculture Bureau, Kunming 650034, China)

Abstract: Village domestic sewage discharge has become one of the major causes of the Dianchi Lake water pollution. Understanding distribution of village sewage pollution is the basic condition for pollution control. Based on the survey data of rural non-point source pollution, we analyzed the pollutant emission amount of village sewage and its spatial pattern in the Dianchi Lake Basin. Applied the Pressure-State-Response(PSR) Model, we identified the key control areas of rural sewage treatment in the Dianchi Lake Basin. Firstly, we took the amounts of the village wastewater discharge and its spatial distribution characteristics as the “state” indicators, as well as the status of sewage treatments and proposed the measurements. The results showed that the village wastewater discharge amounts were as follows: Xishan District>Guandu District>Jinning County>Chenggong County>Panlong District>Wuhua District>Songming County, and lakesides areas>mountainous areas. Depended on the population and the discharge coefficient, the village wastewater discharge amount of the Dianchi Lake Basin was $1.02 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, the COD_{Cr} in the wastewater was $2.18 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, the TN was $761.94 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, and the TP was $98.38 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The weakness and shortage in rural wastewater control was revealed by Gap analysis. It was that the “response” by overlapping between rural wastewater discharge range and the scope of existing urban or township wastewater treatment plants to provide a spatial scheme for developing village-based scattered rural sewage treatment systems. At present, the capacity of urban wastewater treatment plants covered $20\,499.7 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (73.26%) of rural domestic sewage discharge, and township wastewater treatment stations covered $934.8 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (3.34%). So, village-based scattered rural sewage treatment systems should be built to treat the rest $6\,549.2 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, accounted for 23.40% of the village sewage discharge in the Dianchi Lake Basin. Facilities of village-based scattered rural sewage treatment systems were suggested to be established in 157 villages in the coming years in an optimized sequence by priority analysis.

Keywords: Dianchi Lake Basin; village sewage pollution; spatial distribution; sewage treatment

收稿日期: 2011-12-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项研究课题(2009ZX07102-004)

作者简介: 孔维琳(1981—), 女, 云南宣威人, 硕士, 主要研究方向为植被生态学与景观生态学。E-mail: kongweilin@webmail.hzau.edu.cn

* 通讯作者: 王崇云 E-mail: cywang@ynu.edu.cn

滇池流域是云南省居民最密集、人类活动最频繁的地区,是支撑昆明国民经济建设和社会事业发展的基础。随着社会经济的发展和居民生活水平的提高,入湖污染负荷不断增大,滇池富营养化日趋严重,随着滇池水污染治理的深入,点源污染得到有效控制^[1],农村面源污染成为滇池水污染治理的重点之一。农村生活污水是农村面源污染物的主要来源之一^[2],滇池流域多数农村生活污水未经处理直接排入环境,最终汇入滇池而加剧了滇池污染。因此,滇池流域农村生活污水的防治是流域水污染治理的重要环节。近年来,对滇池流域农村生活污水的研究主要集中于农村生活污水产排系数^[3],滇池流域污染总量分析、污染源系统特征^[1],排放污水 TN 和 TP 的人均通量与年负荷量分析^[4],TN、TP、COD_{Cr} 和 TSS 的浓度及其排放特征^[5-7],生活污水处理技术^[8-9]等;而对流域内农村生活污水污染物的空间分布特征及控制研究相对缺乏。

“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response,PSR)模型最早由经济合作和开发组织(Organization for Economic Cooperation and Development,OECD)与联合国环境规划署(United Nations Environment Programme,UNEP)共同提出^[10-11],并广泛应用于生态安全评价、森林管理、渔业管理和农业面源污染等方面^[12-19]。该模型能精确地反映自然、经济、社会因素间的关系,为生态系统健康指标构建提供了一种逻辑基础^[20]。

本文基于 PSR 模型,针对滇池流域农村生活污水的控制,以滇池流域内 7 个区县的行政村为研究对象,利用 GIS 探讨农村生活污水的污染空间分布特征与现有污水控制措施之间的空间耦合关系,并进一步提出农村分散式污水处理设施的建设方案,对滇池流域面源污染治理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,东经 102°30′~103°

00′,北纬 24°28′~25°28′,流域面积 2 920 km²,主要地貌类型为山地丘陵和湖滨平原。滇池湖体略呈弓形,南北长 40 km,东西宽 12.5 km,湖岸线长 130 km,南部滇池称外海,北部称草海,草海面积 8 km²,近几十年来,水质已严重污染,超过国家地表水环境质量劣 V 类标准,草海为重度富营养化状态,外海为中度富营养化状态^[21]。研究区包括 7 个区县:五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡新区、晋宁县和嵩明县,其中有 44 个乡镇及街道(13 个乡、12 个镇、19 个街道),常住农村户籍人口及外来人员近 100 万人,农村生活污水年排放总量在 8.5×10⁶ t 以上^[3]。

1.2 数据收集

村委会农村人口数据来源:第一次全国农业污染源普查数据(滇池流域,2008 年)。

遥感影像及图像数据:1:6 万《滇池盆地图》(2008 年云南科技出版社出版)、两景 Spot5 遥感影像(时相为 2009 年和 2010 年)、20 幅 1:50 000 地形图(1975)、《昆明市污水处理与配套管网建设工程图》(昆明市“十二五”水污染防治规划研究报告)。

在 ERADS 软件下,利用配准过的地形图对 Spot5 遥感影像、《滇池盆地图》和《昆明市污水处理与配套管网建设工程图》进行几何校正,误差范围控制在 1 个像元内。

1.3 生活污水污染负荷核算

采用清单分析法^[22]计算滇池流域 326 个行政村的农村生活污水、总氮(TN)、总磷(TP),化学需氧量(COD_{Cr})排放量,计算公式如下:

村委会生活污水污染物排放量=村委会农村人口数量×人均排污系数(表 1)。

排污系数来源于昆明市农业局《滇池流域农村生活污染源产排污系数测算技术报告》。按照农业部规划设计研究院制定的《重点流域农村生活源产排污系数测算方案》,在滇池流域 7 个区(县)选择有代表性的 90 户农户建设监测点,从 2007 年 10 月开始

表 1 滇池流域农村生活污水排污系数

Table 1 Discharge coefficient of pollutants from village sewage in the Dianchi Lake Basin

排污系数 *	山地丘陵区域	湖滨平原区域
污水量/L·d ⁻¹ ·人 ⁻¹	10.30	30.80
污水含 COD _{Cr} /g·d ⁻¹ ·人 ⁻¹	20.90	65.90
污水含 TP/g·d ⁻¹ ·人 ⁻¹	0.15	0.29
污水含 TN/g·d ⁻¹ ·人 ⁻¹	0.75	2.30
适用范围	嵩明县阿子营乡、滇源镇,官渡区大板桥镇,呈贡县七甸乡,晋宁县六街乡、宝峰镇等类似区域 山地丘陵区域之外的区域	

注:* 排污系数来源于昆明市农业局《滇池流域农村生活污染源产排污系数测算技术报告》(2009)。

到 2008 年 9 月开展定点监测, 每次连续 3 d 对每户农户所产生的生活垃圾和生活污水进行收集、采样检测。所获数据由农业部规划设计研究院汇总, 计算出第一次污染源普查滇池流域农村生活源产排污系数。

1.4 分析方法

以 ArcGIS9.2 作为空间数据管理、空间分析和信息整合平台, 管理和分析农村生活污水排放数据和空间分布特征。

采用自然分等法[Natural Breaks(Jenks)]划分污水排放量等级, 分析污水排放量的空间分布格局。该方法基于数据内部的内在联系进行自然分组, 旨在最大化组间差距并最优化组内相似值, 污染物排放量空间分布梯度的分组点选取在数据变量值出现相对最大变化处^[9]。

采用空白分析法(Gap analysis)^[23], 确定农村生活污水产排与处理方案的空间耦合关系, 使滇池流域农村生活污水得到完全处理, 实现“零”排放。

1.5 “压力-状态-响应”(PSR)模型指标的确定及污水控制措施空间分布格局分析方法

在本文的农村生活污水污染分析中, 各指标分别是: 压力——农村生活污水排放量、污水中 TN、TP 和 COD_{Cr} 含量; 状态——生活污水污染物排放量空间分布格局; 响应——城市污水处理厂、集镇污水处理站和村庄分散式污水处理设施的建设与布局。

通过已校正的《昆明市污水处理与配套管网建设工程图》(昆明市“十二五”水污染防治规划研究报告) 确定城市污水处理厂、集镇污水处理站的空间分布位置。从城市污水处理厂、集镇污水处理站和分散式农村生活污水处理设施 3 个层次对生活污水处理进行分析和规划。

(1)城市污水处理厂: 通过已建和新建扩建城市污水处理厂的纳污范围, 分析该范围内农村和社区的生活污水污染物排放量。

(2)集镇污水处理站: 根据已建和新建集镇污水处理站位置, 得到其纳污覆盖的农村, 并计算相关的生活污水排放量。

(3)分散式农村生活污水处理设施: 针对城市污水处理厂和集镇污水处理站污水处理范围外的区域, 进行分散式农村生活污水处理设施建设方案设计, 污水处理设施的处理量为各农村生活污水排放量之和。

2 结果与分析

2.1 农村生活污水污染物排放量分析

基于滇池流域人口数量(第一次全国农业污染源普查数据, 2008 年) 和农村生活污水排污系数, 计算得到各区县农村生活污水污染物排放量(表 2), 从表中可以看出: 流域内各区县农村生活污水排放量、TN、TP、COD_{Cr} 总量大小均为西山区>官渡区>晋宁县>呈贡县>盘龙区>五华区>嵩明县, 各区县人均污水排放量依次为: 30.80、29.06、27.89、29.34、30.80、30.80、10.30 L·d⁻¹·人⁻¹。

2.2 农村生活污水污染物排放量空间分布格局分析

采用 ArcGIS9.2 软件的自然分等法对各村污染物排放量进行分级, 得到农村生活污水污染物排放量空间分布图(图 1)。

从地貌上看, 湖滨平原区农村生活污水污染物排放量大于山地丘陵区。湖滨平原区农村生活污水排放量为 26 811.6 t·d⁻¹, 占全流域污水排放量的 95.81%, 单位面积排放量为 17.1 t·km⁻²; 山地丘陵区农村生活污水排放量 1 172.2 t·d⁻¹, 占全流域污水排放量的 4.19%, 单位面积排放量为 1.1 t·km⁻²。

表 2 滇池流域农村生活污水污染物排放量
Table 2 The village wastewater discharge amount in Dianchi Lake Basin

区、县	乡、镇(街道)	常住人口	污水排放量/ t·d ⁻¹	COD _{Cr} 含量/ kg·d ⁻¹	TN 含量/ kg·d ⁻¹	TP 含量/ kg·d ⁻¹
嵩明县	阿子营乡、滇源镇	58 396	601.5	1 220.5	43.8	8.8
五华区	红云街道、黑林铺街道、莲华街道、普吉街道	77 095	2 374.5	5 080.6	177.3	22.4
盘龙区	东华街道、金辰街道、茨坝街道、鼓楼街道、双龙乡、青云街道、松华乡、龙泉街道、联盟街道	88 924	2 738.9	5 860.1	204.5	25.8
呈贡县	七甸乡、龙城镇、洛羊镇、大渔乡、吴家营乡、马金铺乡、斗南镇	154 670	4 538.7	9 698.6	338.7	43.3
晋宁县	六街乡、宝峰镇、上蒜乡、新街乡、昆阳镇、晋城镇	192 923	5 381.2	11 482.6	401.3	52.1
西山区	金碧街道、海口镇、棕树营街道、碧鸡镇、永昌街道、福海街道、马街街道、前卫街道	211 116	6 502.4	13 912.5	485.6	61.2
官渡区	大板桥镇、关上街道、金马街道、阿拉乡、官渡镇、矣六乡、六甲乡、小板桥镇	201 188	5 846.6	12 490.0	436.3	56.0

从乡镇和街道上,农村生活污水污染物排放总量最大的是马街街道和福海街道,人均排放量 $30.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,总排放量分别为 1970.8 、 $1872.5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$;其次是晋城镇、昆阳镇和小板桥镇,人均排放量 $30.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$,总排放量分别是 1604.6 、 1495.9 、 $1419.0 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$;污水排放量最小的乡镇是七甸乡,人均排放量 $10.3 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$,排放总量为 $112.1 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,排放量最小的街道是东华街道,人均排放量 $30.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$,排放量为 $11.4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,马街街道的生活污水排放总量约是七甸乡的 17 倍,约是东华街道的 173 倍。

从村委会和居委会看,污染物排放量最大的是西山区的张峰社区,生活污水、 COD_Cr 、TN、TP 人均排放量为 $30.8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 65.9 、 2.3 、 $0.29 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$,总排放量分别是 $1039.6 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 2224.3 、 77.6 、 $9.8 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$;最小的是嵩明县的金钟村,生活污水、 COD_Cr 、TN、TP

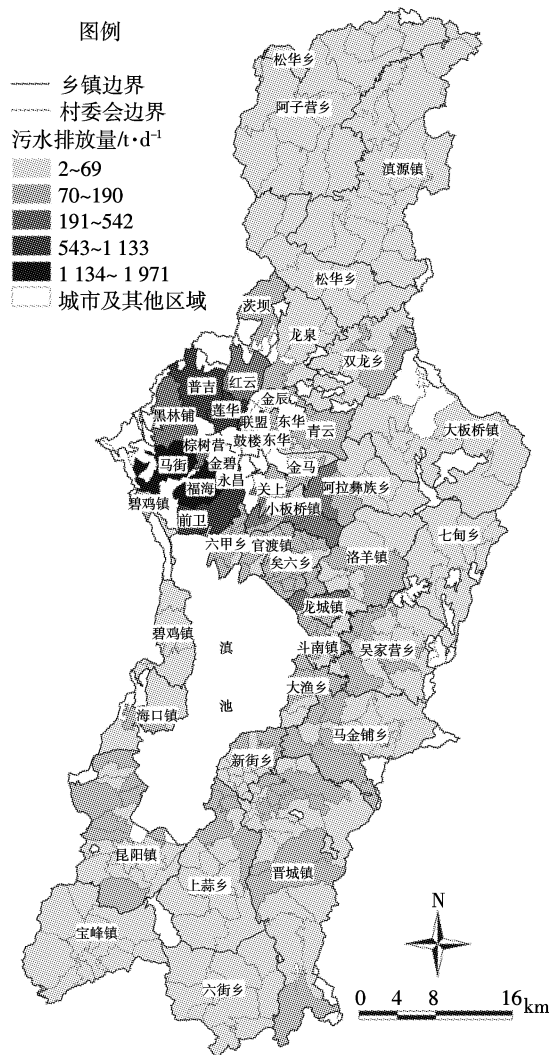
的人均排放量分别为 $10.3 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$ 和 20.9 、 0.75 、 $0.15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$,总排放量分别是 $2.3 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 4.9 、 0.2 、 $0.03 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。张峰社区生活污水排放总量约是金钟村的 45 倍。

2.3 农村生活污水污染控制

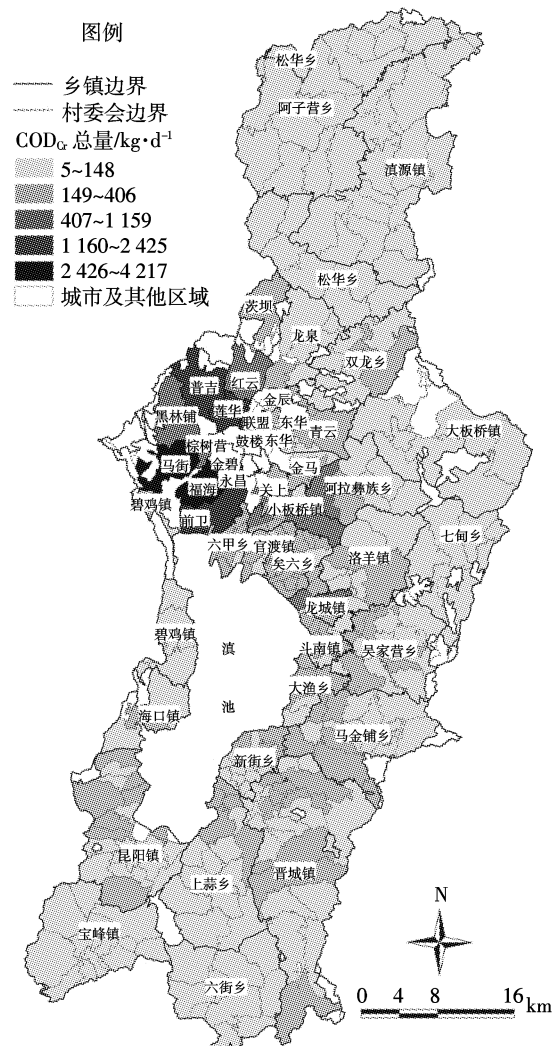
结合滇池流域内污水处理规划,根据污水排放量及空间分布特征,从 3 个层次对滇池流域农村生活污水进行控制分析,即:城市污水处理厂、集镇污水处理站和分散式农村生活污水处理设施。分析现有和已规划的城市污水处理厂和集镇污水处理站的污水处理范围及污水处理量,在此基础上提出分散式农村生活污水处理设施的建设方案。

2.3.1 城市污水处理厂

滇池流域内已建和新建污水处理厂共 22 座,根据相关资料^①得到纳污范围及纳污面积。在 GIS 支持



(a)农村生活污水排放量



(b) COD_Cr 排放量

①昆明市“十二五”水污染防治规划研究报告、昆明市“十二五”环境保护规划重点项目:区县污水省理设施建设项目。

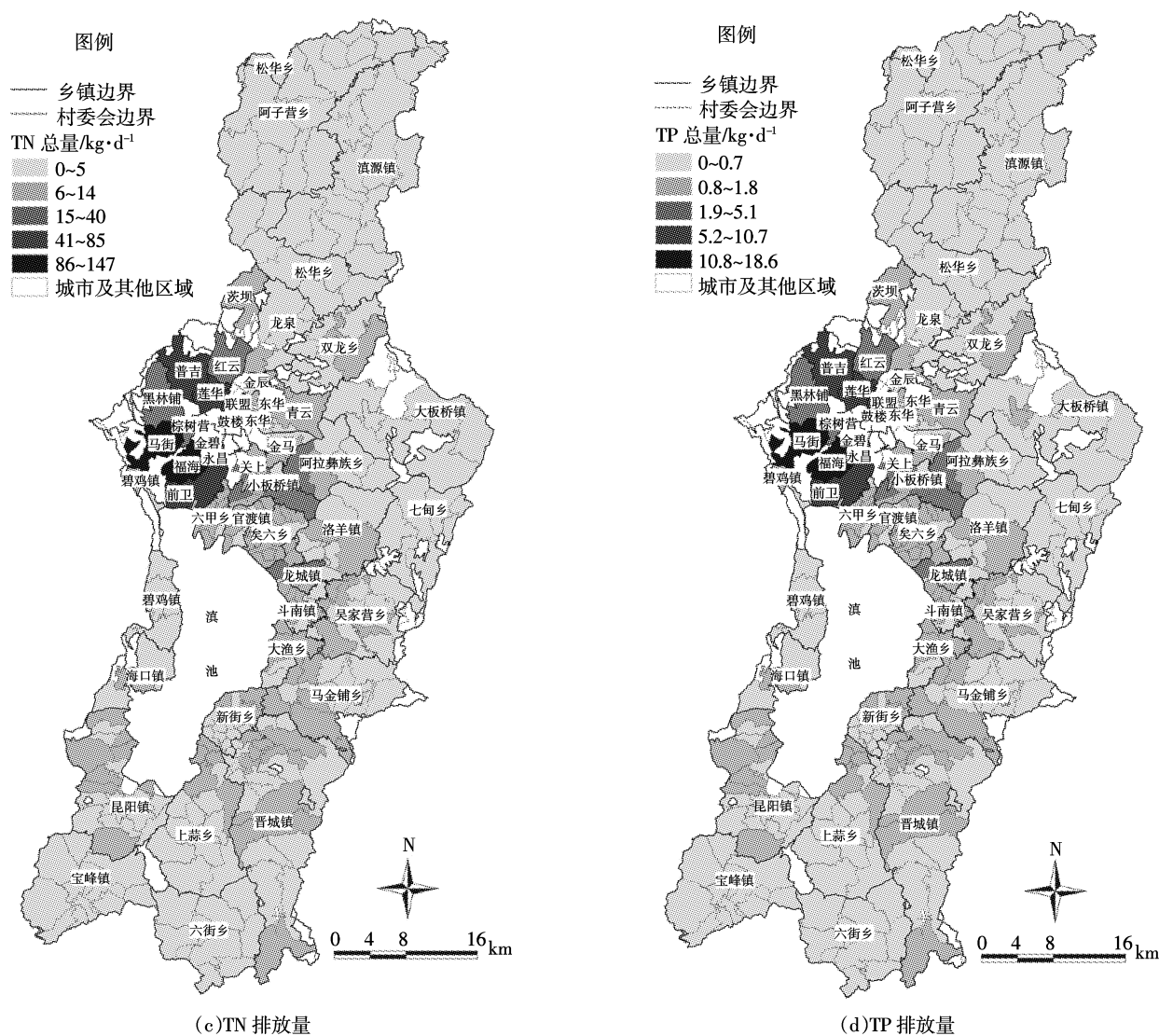


图 1 滇池流域农村生活污水污染物排放量

Figure 1 Wastewater discharge amount and pollutants emission amount of village sewages in Dianchi Lake Basin

下,通过全国 1:5 万地形数据、1:6 万《滇池盆地图》及 Spot5 遥感影像,确定村委会所在位置,并划分污水处理厂纳污范围,分析村委会和污水处理厂纳污范围的空间分布格局,得出纳污范围外的村委会和社区居委会分布状况(图 2)。

污水处理厂纳污范围主要是滇池北岸的湖滨平原区,包括五华区的全部区域,官渡区、盘龙区、西山区和呈贡县的大部分区域。滇池流域有 326 个村委会和社区居委会,其中 151 个在污水处理厂纳污范围内,包括马街街道、福海街道等生活污水排放量最大的区域。

根据污水处理厂的纳污范围,提取其纳污范围内的村委会和社区,因为污水处理厂是处理纳污范围内

的城市及农村生活污水,所以根据纳污范围内农村人口数量及其排污系数,估算纳污范围内的农村生活污水污染物排放量,该排放量即为污水处理厂对农村生活污水污染物的处理量。污水处理厂完全建成后,预计农村生活污水量、 COD_{Cr} 、TN、TP 的处理量分别为: $20\,499.7\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $43\,851.7$ 、 $1\,530.7$ 、 $193.5\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$, 分别占流域总排放量的 73.26%、73.40%、73.32% 和 71.78%。

2.3.2 集镇污水处理站

根据《昆明市污水处理与配套管网建设工程图》,确定集镇污水处理站位置,得到集镇污水处理站分布图(图 3)。

流域内已建和新建集镇污水处理站共 28 个,有

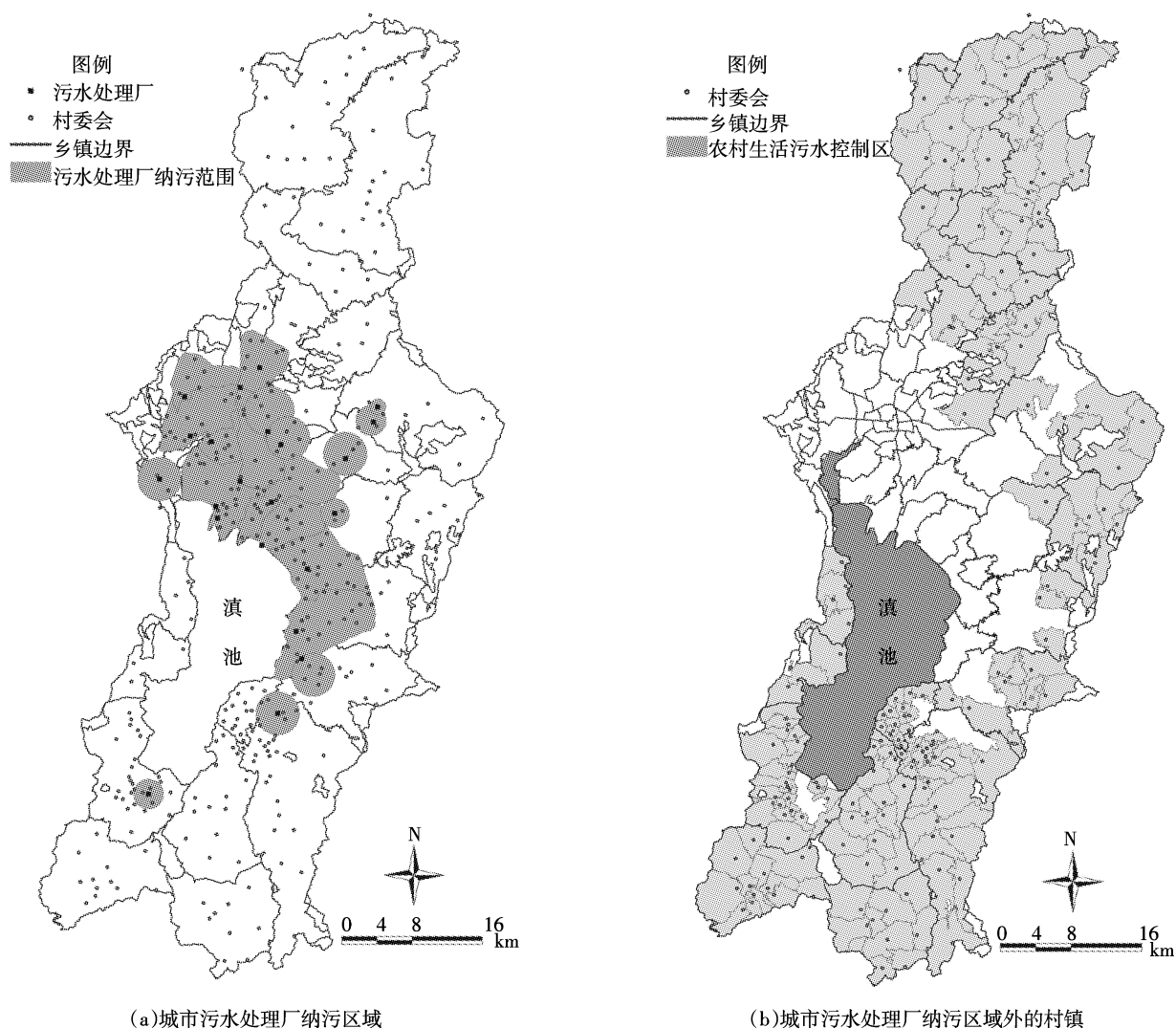


图 2 滇池流域城市污水处理厂纳污分析

Figure 2 Treatment coverage analysis by urban waste treatment plant capacity in Dianchi Lake Basin

18 个分布于待处理范围内, 它们将处理污水处理站所在村委会或居委会的农村生活污水。根据《昆明市“十二五”水污染防治规划研究报告》, 昆明市 2011—2015 年间新建集镇污水处理站规模最小为 $0.02 \text{ 万 t} \cdot \text{d}^{-1}$, 远大于滇池流域内各村镇和街道社区的污水排放量。因此, 集镇污水处理站能够完全处理其纳污覆盖范围内的农村生活污水。

污水处理站建成后, 基于农村人口数量及其排污系数, 得到集镇污水处理站对农村生活污水、 COD_{Cr} 、TN、TP 的处理量为 $934.8 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1\ 983.9$ 、 69.5 、 $9.6 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别占流域总排放量的 3.34% 、 3.32% 、 3.33% 和 3.56% 。

2.3.3 分散式农村生活污水处理设施

农村生活污水排放量通过城市污水处理厂和

污水处理站的控制后, 需进行生活污水处理的行政村剩余有 157 个, 见图 4(a), 生活污水排放总量为 $6\ 549.2 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 占全流域农村生活污水排放量的 23.4% 。根据《昆明市推进城乡一体化工作精神》(2010) 和《滇池流域“十二五”水污染防治规划》, 分三步进行分散式农村生活污水处理设施建设, 即: 2010 年、2012 年和 2015 年。参照《昆明市农村环境综合整治行动计划》(2010), 按照行政村综合整治任务中各时间段进行综合整治的行政村数量比例, 计算得到行政村数量, 以此作为分散式农村生活污水处理设施建设数量(表 3), 实现完全处理滇池流域内农村生活污水的目标。

2.3.4 分阶段实施方案

根据该区域农村生活污水排放量空间分布特征

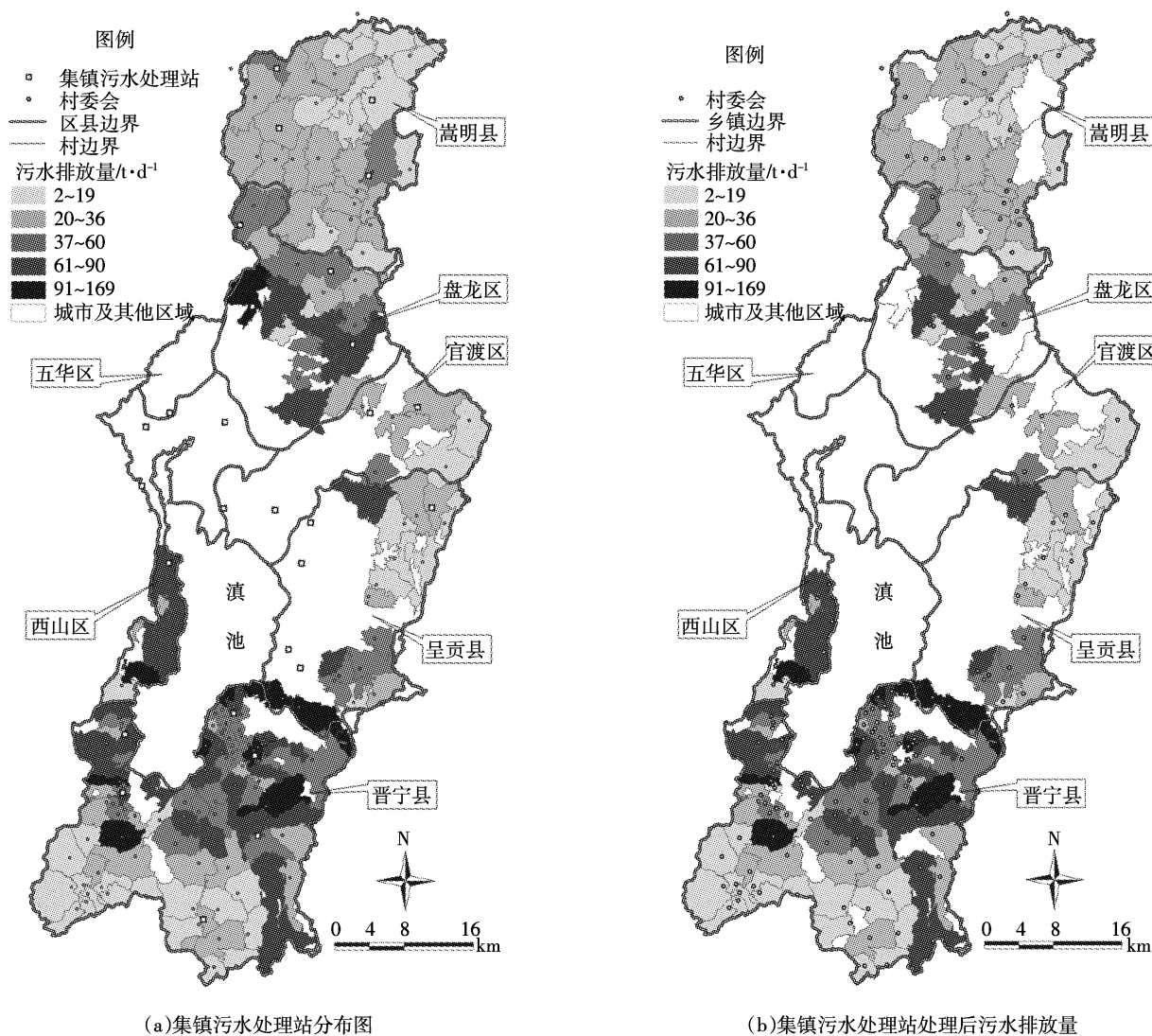


图 3 滇池流域集镇污水处理站纳污分析

Figure 3 Treatment coverage analysis by township sewage treatment station capacity in Dianchi Lake Basin

和滇池流域地貌特征,并结合水库水源区与行政村空间关系,分 3 个阶段设计分散式农村生活污水处理设施建设方案。方案包括各时间段内,主城区、呈贡县、嵩明县和晋宁县分别完成分散式农村生活污水处理

设施建设的行政村数量及空间位置等内容。具体方案如下:

(1)2010 年,滇池流域选取 53 个行政村进行分散式生活污水处理设施建设,选取标准为:①因为主城区、晋宁县和嵩明县内分布有松华坝水库、宝象河水库、大河水库、柴河水库等主要饮用水库,所以这 3 个区县优先选取位于水源区内的行政村;②在优先考虑水源区的基础上,依据各行政村污水排放量从大到小,在主城区、呈贡县、晋宁县和嵩明县 4 个区域内选取行政村。设施建设完成后,根据人口数量和排污系数,预计将处理农村生活污水 2 367.7 t·d⁻¹,占全流域农村生活污水排放量的 8.46%,设施建成后农村生活污水排放量空间分布见图 4(a)。

(2)2012 年,共选取 84 个行政村建设分散式生

表 3 滇池流域分散式农村生活污水处理设施建设数量

Table 3 Development scheme of facilities of village-based scattered rural sewage treatment systems in Dianchi Lake Basin

区域	分散式农村生活污水处理设施建设数量			合计
	2010 年	2012 年	2015 年	
昆明市主城区	12	11		23
呈贡县	9	9		18
晋宁县	27	53	9	89
嵩明县	5	11	11	27
合计	53	84	20	157

活污水处理设施。对主城区和呈贡县剩余行政村进行污水处理设施建设;晋宁县则按照污水排放量从大到小进行选取;嵩明县优先选取村委会位于松华坝水源保护区的行政村。设施建设完成后,根据人口数量和排污系数,农村生活污水处理量预计为 $3\,805.2\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$, 占全流域农村生活污水排放量的 13.60%, 设施建成后农村生活污水排放量空间分布见图 4(b)。

(3)2015 年,晋宁县、嵩明县计划完成流域内所有剩下的行政村污水处理设施建设。设施建设完成后,根据人口数量和排污系数,农村生活污水处理量预计为 $376.3\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$, 占全流域农村生活污水排放量的 1.34%, 设施建成后流域内农村生活污水将实现全面处理,见图 4(c)。

滇池流域农村生活污水经过城市污水处理厂、集镇污水处理站和分散式农村生活污水处理设施的处

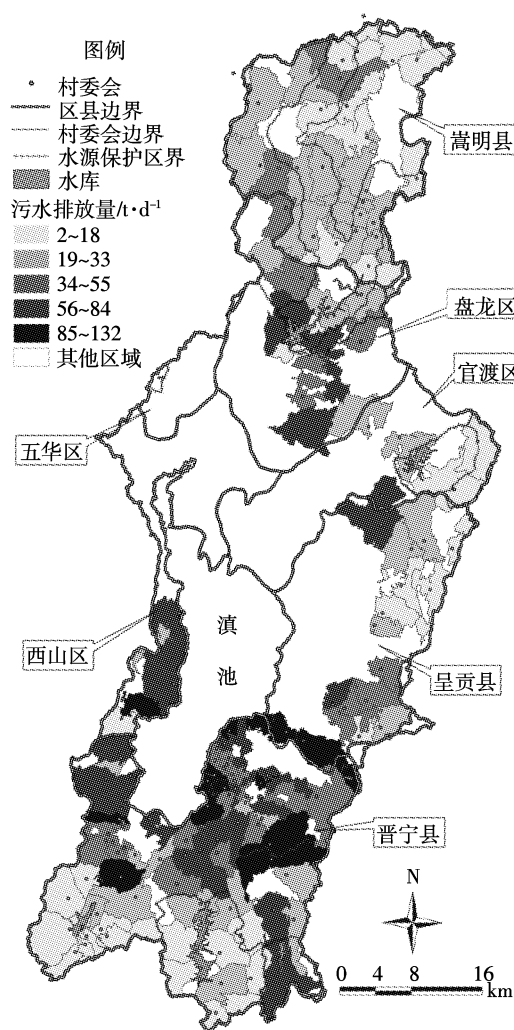
理,可使流域内农村生活污水处理率达 100%(表 4)。

3 讨论

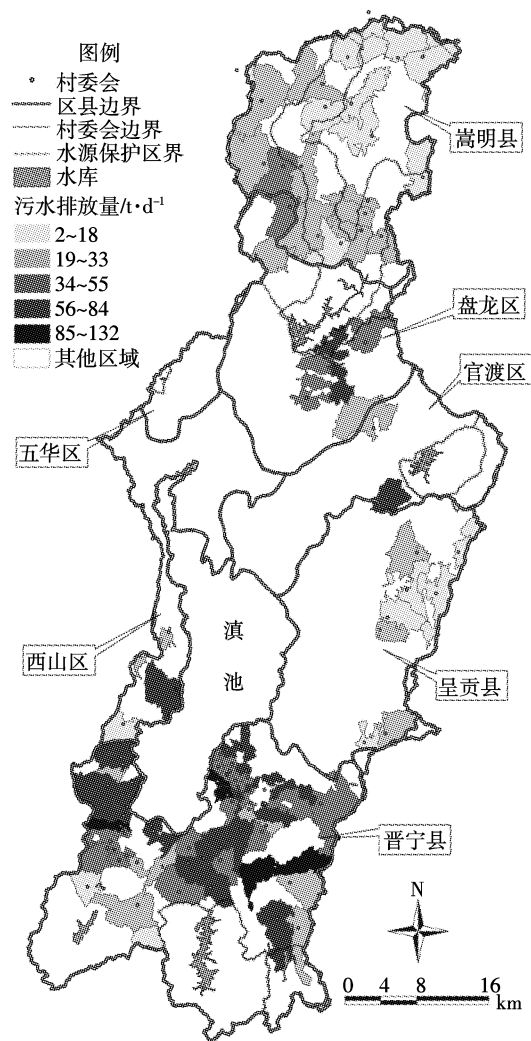
本文基于 PSR 模型,重点分析滇池流域各行政村农村生活污水污染物排放量及其空间分布格局,分析生活污水处理的重点区域。说明生活污水排放对滇池流域造成的“压力”,并以污染物在流域内各行政村的排放量大小及空间分布特征作为“状态”指标,在此基础上,采用空白分析法提出“响应”。

3.1 压力与状态

湖滨平原区的农村生活污水污染物排放量大于山地丘陵区。湖滨平原区是城乡结合部的主要分布区域,滇池流域农村生活污水排放量最大的马街街道和福海街道就在该区。这一结果与张德刚等^[4-6]研究滇池流域城郊村镇排放污水污染物浓度均高于一般城市



(a)2010 年



(b)2012 年

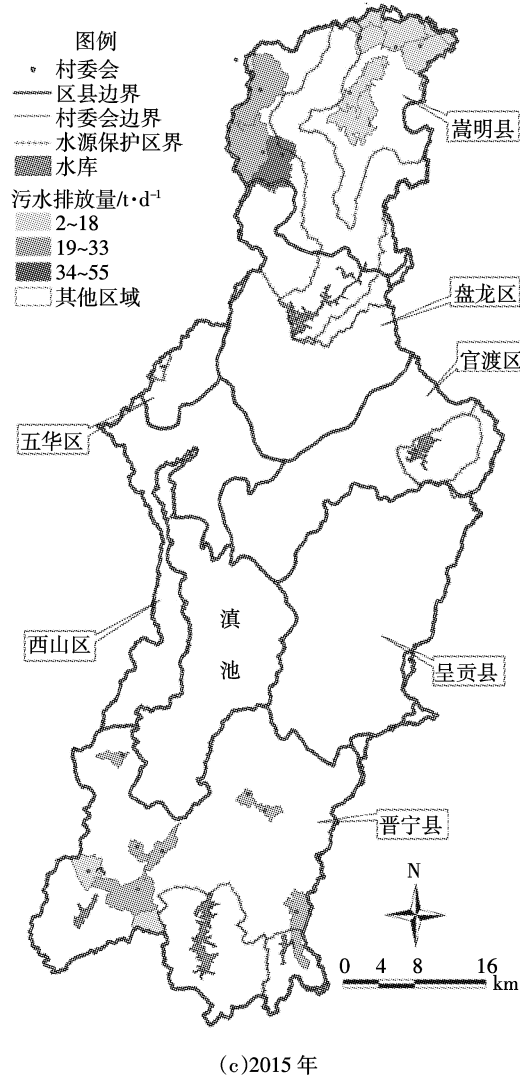


图 4 滇池流域分散式农村生活污水处理设施纳污分析
Figure 4 Treatment coverage analysis by facilities for village-based scattered rural sewage treatment systems in Dianchi Lake Basin

表 4 滇池流域污水处理设施农村生活污水处理量
Table 4 The rural wastewater treatments by different sewage treatment facilities in Dianchi Lake Basin

污水处理设施		污水处理量/t·d ⁻¹	百分比/%
城市污水处理厂		20 499.7	73.3
集镇污水处理站		934.8	3.3
分散式农村生活污水 处理设施建设	2010	2 367.7	8.5
	2012	3 805.2	13.6
	2015	376.3	1.3
滇池流域农村生活污水排放量		27 983.8	100.0

和农村生活污水的结果一致,廖日红等^[24]对北京市农村生活污水排放的研究也得到城乡结合部排放量大于山区的结果。

湖滨平原区经济较发达,由于流动人口分布具有郊区和新城区工厂集聚区指向性^[25],这些地区流动人口数量相对较大;此外,由于城中村改造,使得流动人口向城郊的城乡结合部转移^[25],加大了该地区的污水排放量。相对于湖滨平原区,山地丘陵区地广人稀,居民点分散,农村生活污水产排系数低于湖滨平原区^[3-6,24],生活污水排放量小,但排放分散,集中处理存在难度。

滇池流域草海汇水区域人口密度高,基础设施缺乏,大量生活污水未经处理直接排放^[26-27],造成草海水水质继续恶化。因此,城乡结合部将是农村生活污水污染控制的重点区域,应加强该区排污管道和设施的建设。

3.2 响应

城市污水处理厂的纳污范围主要是湖滨平原区,这些区域是滇池流域城市建成区和规划区。然而,随着城乡一体化进程,流域内已建城市污水处理厂污水处理压力越来越大,其处理规模已不能满足昆明市污水排放现状^[28],因而应对已建污水处理厂进行扩建和技术改造,提高其污水处理能力。此外,从全国范围看^[29],我国近期投运的大量污水处理厂并没有满负荷运行,尚未发挥现有污水处理厂的最大效益,造成了严重的资源浪费。滇池流域新建污水处理厂的规模设计应切合实际污水排放量。

分散式污水处理设施建设的区域,污水排放量最大的晋宁县的湖滨平原区,该区域是晋宁新城和海口新城的城镇建设区,人口相对密集,应优先进行污水处理设施建设。国内有关农村生活污水分散式处理研究多集中于技术方面,国内常用技术^[30]有厌氧沼气池处理技术、稳定塘处理技术、人工湿地处理技术、土壤渗滤处理技术和农村生活污水分散式处理适用技术等。

本文针对滇池流域污水处理厂站纳污范围以外的区域,提出农村分散式生活污水处理设施建设方案。根据昆明市饮用水水库水源区与村庄空间位置关系,以及各区县农村生活污水排放量空间分布特征,确定优先建设区域,按照污水排放量从大到小建设分散式农村生活污水处理设施。

4 结论

(1)滇池流域内各区县农村生活污水污染物排放量大小为西山区>官渡区>晋宁县>呈贡县>盘龙区>五华区>嵩明县,基于人口数量和排污系数的计算,全流域农村生活污水排放量为 1 021.4 kt·a⁻¹,COD_{Cr}排

放量为 $21\ 806.87\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, TN 排放量为 $761.94\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, TP 排放量为 $98.38\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

(2)从乡镇和街道上看,生活污水污染物排放量最大的是马街街道和福海街道,生活污水排放量分别为 $1\ 970.8$ 、 $1\ 872.5\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$;从地貌上看,湖滨平原区的污染物排放量大于山地丘陵区,湖滨区生活污水排放量是 $26\ 811.6\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$,占全流域污水排放量的 95.81%;从农村和社区上看,排放量最大的是张峰社区,生活污水排放量是 $1\ 039.6\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

(3)污水处理设施建成后,预计城市污水处理厂、集镇污水处理站和分散式农村生活污水处理设施对农村生活污水处理量分别为 $20\ 499.7$ 、 934.8 、 $6\ 549.2\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$,各占流域污水总排放量的 73.26%、3.34%和 23.40%,以上设施将完全处理流域内排放的农村生活污水。

参考文献:

- [1] 杨文龙,丁宏伟.滇池水污染总量控制中污染源系数特征研究[J].云南环境科学,2001,20(2):40-42.
YANG Wen-long, DING Hong-wei. Study on pollution source features in totality control of water pollution in Dianchi Lake[J]. *Yunnan Environment Sciences*, 2001, 20(2):40-42.
- [2] 王洪涛,陆文静.农村固体废物处理处置与资源化技术[M].北京:中国环境科学出版社,2006.
WANG Hong-tao, LU Wen-jing. Technology of solid waste reutilization treatment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [3] 严婷婷,王红华,孙治旭,等.滇池流域农村生活污水产排污系数研究[J].环境科学导刊,2010,29(4):46-48.
YAN Ting-ting, WANG Hong-hua, SUN Zhi-xu, et al. Research on coefficients of producing and discharging pollutants of domestic wastewater in rural areas in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(4):46-48.
- [4] 张德刚,汤利,陈永川,等.滇池流域典型城郊氮磷污染负荷定量研究[J].水土保持学报,2009,23(5):167-170.
ZHANG De-gang, TANG Li, CHEN Yong-chuan, et al. Pollution load of N and P from typical suburb regions in Dianchi Lake catchments[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5):167-170.
- [5] 张德刚,汤利,陈永川,等.滇池流域典型城郊村镇排放污水氮、磷特征分析[J].农业环境科学学报,2007,26(6):2245-2250.
ZHANG De-gang, TANG Li, CHEN Yong-chuan, et al. Study on discharge rule and character of nitrogen and phosphorus for household wastewater from suburb typical region in Dianchi Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2245-2250.
- [6] 张德刚,汤利,陈永川,等.滇池流域典型城郊村镇排放污水 COD_{Cr}、TSS 特征分析[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1446-1449.
ZHANG De-gang, TANG Li, CHEN Yong-chuan, et al. Study on discharge rule and character of COD_{Cr} and TSS for household wastewater from suburb typical region in Dianchi Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1446-1449.
- [7] 张德刚,陈永川,汤利.滇池流域典型城郊降雨径流污染特征与排放过程[J].农业环境科学学报,2010,29(4):733-739.
ZHANG De-gang, CHEN Yong-chuan, TANG Li. Pollution characteristics and discharging process in the direct runoff from suburb areas in Dianchi Lake catchments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):733-739.
- [8] 张建,黄霞,施汉昌,等.滇池流域村镇生活污水地下渗滤系统设计[J].给水排水,2004,30(7):34-36.
ZHANG Jian, HUANG Xia, SHI Han-chang, et al. Design of subsurface infiltration system to treat rural domestic wastewater in Dianchi valley[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30(7):34-36.
- [9] 刘超翔,胡洪营,黄霞,等.滇池流域农村污水生态处理系统设计[J].中国给水排水,2003,19(2):93-94.
LIU Chao-xiang, HU Hong-ying, HUANG Xia, et al. Design for ecological treatment system of rural sewage in the Dianchi valley[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(2):93-94.
- [10] Washington D C, Allen Hammond. Environmental indicators: A systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development[M]. USA: World Resource Institute, 1995:11-15.
- [11] 全川.环境指标研究进展与分析[J].环境科学研究,2000,13(4):53-55.
TONG Chuan. Review on environmental indicator research[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(4):53-55.
- [12] Xiaorui Bai, Jingchun Tang. Ecological security assessment of Tianjin by PSR model[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2:881-887.
- [13] YE Hua, MA Yan, DONG Limin. Land ecological security assessment for Bai Autonomous Prefecture of Dali Based using PSR model: With data in 2009 as case[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5:2172-2177.
- [14] Pei Liang, Du Liming, Yue Guijie. Ecological security assessment of Beijing Based on PSR model original research article[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2:832-841.
- [15] Lin Zhen, Shuyan Cao, Yunjie Wei, et al. Comparison of sustainability issues in two sensitive areas of China[J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(8):1153-1167.
- [16] Tze-Chin Pan, Jehng-Jung Kao. Inter-generational equity index for assessing environmental sustainability: An example on global warming[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(4):725-731.
- [17] Bernhard Wolfslehner, Harald Vacik. Evaluating sustainable forest management strategies with the Analytic Network Process in a Pressure-State-Response framework[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(1):1-10.
- [18] Ching-Hsiwenn Ou, Wen-Hong Liu. Developing a sustainable indicator system based on the pressure-state-response framework for local fisheries: A case study of Gungliaw, Taiwan[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2010, 53(5-6):289-300.
- [19] 姜世英,韩鹏,贾振邦,等.南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2153-2162.
JIANG Shi-ying, HAN Peng, JIA Zhen-bang, et al. Evaluation with

- PSR model and GIS analysis of agricultural non-point source pollution in Danjiangkou Reservoir of the Mid-Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2153-2162.
- [20] 麦少芝, 徐颂军, 潘颖君. PSR模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. *热带地理*, 2005, 25(4):317-322.
- MAI Shao-zhi, XU Song-jun, PAN Ying-jun. Application of the PSR model to the evaluation of wetland ecosystem health[J]. *Tropical Geography*, 2005, 25(4):317-322.
- [21] 刘丽萍. 昆明市水环境承载力研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(2):145-148.
- LIU Li-ping. Research on water environmental carrying capacity of Kunming City[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, 22(2):145-148.
- [22] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(6):751-755.
- CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning, LAI Si-yun. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):751-755.
- [23] F William BURLEY. Monitoring biological diversity for setting priorities in conservation[C]//Edward Osbome Wilson. Biodiversity. Washington: National Academy Press, 1988:227-230.
- [24] 廖日红, 顾 华, 申颖洁, 等. 北京市农村生活污水排放现状调研与分析[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(2):30-33.
- LIAO Ri-hong, GU Hua, SHEN Ying-jie, et al. Investigation and analysis of rural domestic sewage discharge situation in Beijing suburbs[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(2):30-33.
- [25] 姚华松, 许学强, 薛德升. 广州流动人口空间分布变化特征及原因分析[J]. *经济地理*, 2010, 30(1):40-46.
- YAO Hua-song, XU Xue-qiang, XUE De-sheng. On Spatial distribution and evaluative laws of floating population Guangzhou[J]. *Economic Geography*, 2010, 30(1):40-46.
- [26] 王映雪. 昆明市“城中村”生态环境管理对策研究[J]. *云南环境科学*, 2006, 25(1):21-23.
- WANG Ying-xue. Ecological environmental management on villages inside the urban area of Kunming[J]. *Yunnan Environment Sciences*, 2006, 25(1):21-23.
- [27] 潘 珉, 高 路. 滇池流域社会经济发展对滇池水质变化的影响[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(6):117-122.
- PAN Min, GAO Lu. The influence of socio-economic development on water quality in the Dianchi Lake[J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(6):117-122.
- [28] 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[J]. *环境科学导刊*, 2008, 27(6):47-48.
- YU Dong, ZHAO Shi-min, LI Fa-rong. Present situation of waste water treatment of Kunming and its effect on Dianchi Lake protection[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(6):47-48.
- [29] 杨 勇, 王玉明, 王 琪, 等. 我国城镇污水处理厂建设及运行现状分析[J]. *给水排水*, 2011, 37(8):35-39.
- YANG Yong, WANG Yu-ming, WANG Qi, et al. Analysis on current municipal wastewater treatment plants operation in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(8):35-39.
- [30] 张家伟, 周志勤. 浅析农村生活污水分散式处理适用技术[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(1):95-99.
- ZHANG Jia-wei, ZHOU Zhi-qin. Analysis on appropriate technology for decentralized treatment of rural domestic sewage[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(1):95-99.