

大清河流域典型村镇生活污水排放规律和污染负荷研究

袁晓燕, 余志敏, 施卫明

(中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 南京 210008)

摘要:城乡结合部地带的村镇生活产污已经成为滇池流域水环境污染的重要来源之一,研究村镇生活污水水质特征和污染排放规律,将有助于正确认识、科学把握农村面源污染特征,有利于流域污染控制策略的制定和治理工程的开展。选择入滇池的大清河小流域中的典型村镇,采用定点动态采样的方法,研究了城郊型村镇生活污水水质特征和污染排放规律,并估算了研究区典型村镇生活污水污染负荷。研究结果表明,研究区内村镇生活污水 TN、TP、COD_{Cr} 浓度高, BOD₅/COD_{Cr} 比值低。生活污水中污染物在早上 8:00 和晚上 18:00 以后浓度较高,排放通量以及污水排放量在上午 10:00 和晚上 20:00 有两个峰值;工作日污水中 COD_{Cr} 浓度显著高于周末,但其他指标在工作日和周末之间没有显著性差异。污染负荷估算结果表明,研究区内的城郊村镇雨季污染物排放总量高于旱季,尤其是可溶性无机盐的排放主要集中于雨季,雨季人均污染排放量也明显高于旱季。由此指出,研究区域的城郊村镇内,生活污水单位面积污染负荷高,早上和晚上是一天内生活污水污染控制的重要时段,雨季是一年内污染控制的重要时期。

关键词:城郊村镇;生活污水;污染排放通量;地表水质

中图分类号:X502 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)08-1547-11

Domestic Sewage Emission Dynamics and Pollutant Loading Capacity of the Daqing River Valley: A Case Study on the Village Scale

YUAN Xiao-yan, YU Zhi-min, SHI Wei-ming

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The domestic sewage from the intersection of city and countryside is becoming a significant pollution source to the Dianchi Lake. Surveys of the quality characteristics and the discharge dynamics of domestic sewage provides scientific basis for the development of pollution control strategies and the implementation of efficient environmental engineering. In this study, on-site surveys were continuously conducted in typical suburban villages of the Daqing River basin to reveal sewage water quality and its discharge pattern. The pollutant loading capacity of the experimental area was further estimated. Our results showed that: domestic sewage water of the study area was characterized by high concentrations of TN, TP and COD_{Cr}, and low ratio of BOD₅/COD_{Cr}, indicating poor biodegradability of the sewage from these villages; higher pollutant contents in the sewage was monitored at 8:00 am and 18:00 pm as well; the sewage discharge was peaked at 10:00 am and 20:00 pm; except that COD_{Cr} of the sewage in work days was obviously higher than in the weekends, other water quality indicators showed no significant differences between work days and weekends. The total pollutant load of the study area was higher in rainy season as compared with dry seasons. Particularly, soluble inorganic salts were discharged mainly in rainy season. Per capita pollution discharge was also higher in rainy season. Conclusively, per unit area pollution load of domestic sewage in the survey villages was in high risk; and the major daily pollution control time periods should be in early mornings and evenings that reflect activities of human behavior. On the seasonal scales, rainy seasons should be greatly accounted for pollution control.

Keywords: suburban villages; domestic sewage; pollutant discharge; surface water quality

收稿日期: 2010-01-29

基金项目: 国家 863 计划“城郊面源污水综合控制技术与工程示范”(2005AA601010-02); 国家科技支撑计划课题“农田污染过程阻断关键技术研究”(2006BAD17B03)

作者简介: 袁晓燕(1983—), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事面源污染控制方面的研究。E-mail: xyyuan@issas.ac.cn

通讯作者: 施卫明 E-mail: wmsi@issas.ac.cn

近 20 a 来,随着城镇化进程的加快,滇池周边小城镇发展迅速,带动了农村经济繁荣,使得原有的单一型农业乡镇变成了城乡结合部,并且城乡结合部的面积迅速扩大,城镇人口也急剧增加。从 2003 年至 2008 年,昆明市城镇化率由 38.6% 增加到 60.1%,常住人口达到 623.9 万人^[1]。城镇化的发展也带来了新的环境问题,主要表现在:城乡结合部高度密集的人群和相对发达的经济,导致生活、生产排污增加,环境污染负荷加重;另一方面,城乡结合部普遍存在生活污水收集管网建设滞后、生活污水处理设施缺乏等问题,使得高污染负荷和低处理率的矛盾比较突出,已经成为流域水体污染主要原因之一^[2-4]。

城乡结合部的村镇具有城市和农村的双重特点,导致生活污水的排放量较传统的乡村地区更大,而污染物浓度变化范围较城市地区更广。排放途径面源化,从而使得城郊型村镇面源污水排放特征不能照搬城市生活污水和纯农业型乡镇的生活污水的排放规律。但是,有关城郊型村镇生活污水水质特征和排放规律的基础资料相对较少,研究难度也较大。

与城市生活污水排放特征显著不同的是,由于村镇居民生活方式和经济条件的多样性和复杂性,村镇生活污水中含有大量的生活废料和人畜粪尿,导致村镇生活污水污染物的成分、浓度和污染物的排放量等空间和时间变异性大^[5-7],给准确把握农村生活污水的水质特征及其昼夜、季节性变化带来较大困难。由于缺乏基础排污管网设施,村镇生活污水纳管比例较低,开放式的排水方式使得生活污水中污染物排放规律容易受到当地气候条件、地表特征和强降雨等的影响^[8-10]。缺少村镇生活污水水质数据、污水排水量以及污染排放规律等基础研究,将无法准确判断农村生活污水污染特征,评价生活污水污染负荷,预测流域面源污染发展趋势。研究城郊型村镇生活污水的水质特征和污染排放规律,有助于准确把握新的社会发展形势下,新型农村生活污水排放量、水质特征以及污染物排放规律,正确估计农村面源污染现状和发展趋势,合理估算农村面源污染负荷;另一方面,这些研究也有助于科学选取适宜的生活污水处理技术,合理设计工程规模和工艺参数,为流域面源污染控制提供基础有效的支撑。

大清河是入滇池的主要河流之一,由于上游贯穿昆明城区,使得下游入湖口流域许多村镇经济发展迅速,地面硬质化比例高,居民生活条件好,新建居民住宅楼增加迅速。人口迅速增长带来生活污水排放量的

急速增加,其污染负荷已经远远超出了自净能力,严重影响了滇池湖湾水质^[11]。本文研究区位于昆明市大清河入滇池的湖口流域,属于典型的滨湖城郊型村镇,其城镇化水平已经超过 90%^[12]。

本文选取大清河沿岸一个代表性的村镇——张家庙作为生活污水污染物排放通量的研究点。采用周年定点动态采样分析的方法,重点研究了村镇居民生活污水污染物排放特征、生活污水排放量动态变化特征和生活污水中污染物排放量。期望通过研究,初步揭示滇池流域城郊型村镇生活污水的排放规律和特征,为该流域城郊型村镇面源污水的控制和治理工程提供基础参考。由于滇池流域滨湖城郊型村镇特征与太湖流域滨湖城郊型村镇特征有一定的相似性,研究结果对于太湖流域滨湖城郊型村镇生活污水排放特征和规律的研究及其治理也有一定的参考价值。

1 试验点与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于昆明市盘龙区张家庙、严家村和叶家村,属于滇池北岸的大清河滇池入湖口流域,紧邻昆明市第二污水处理厂,西起盘龙江东岸,东至大清河西岸,构成相对封闭的水系区域,如图 1 上所示。张家庙、严家村和叶家村属于典型的城乡结合部,居民聚集密度大,地面硬质化比率达 80% 以上,农民自建房与菜市场、小作坊、出租房等混杂。研究区总面积 0.63 km²,总人口约 3 960 人;具有排水明沟系统,生活污水通过村内排污明沟进入排水干渠,目前主要排水干渠有 6 条,由排污暗管与大清河直接连通。根据地形特点和生活污水排放方式,选取研究区内主要的 6 条主排水干渠作为生活污水水质监测点,这 6 处排水干渠集污范围几乎涵盖了全部村落生活排污。

在张家庙村内选取了一个排水明渠完善、集污范围相对集中的区域作为生活污水排放规律研究的试验点(图 1 下),这个试验点污水收集覆盖面积约为 3 192 m²,是一个居民区与小商业区的混合区。该试验点内的居民生活污水和废水均由街面排水明渠汇集于同一个中等排水沟渠,并最终汇入一条连通大清河的暗渠,采样取水口设置于排水沟渠的末端。该试验点内包括约 40 栋农民自建房,3 层至 5 层不等,底层邻街面为商业门面房,多余房间大多为出租房和家庭小旅馆。底层门面房有杂货店、理发店、米店、药店、话吧、五金店等,包括 3 个小吃店和 3 个加工作坊。通过详细的实地调查,试验点内常住人口 251 人;经商和



图 1 研究区位置和范围,以及试验点位置图

Figure 1 Location and the approximate range on map of the research area and the dynamic test point.

出租屋、小旅馆等流动人口较多,因此,取研究点的人口当量为 400 人。主街道每日上午作为小型集贸市场,集中有很多水果、蔬菜、活鱼、肉品摊点,由于缺乏管理,商贩乱扔垃圾、污水随地泼洒;小区内 1 处垃圾集中站,1 处公用旱厕,卫生环境差,污水、垃圾渗滤液横流。

1.2 试验方法

水质监测的生活污水样品取自 3 条主排水沟渠的生活污水水质监测点,每次采样分析后取多点平均值代表该村镇生活污水水质浓度。采样时间为 2006 年 8 月至 2007 年 8 月,每个月采样 3 次。

在试验点的排水沟渠末端设置取水口,2006 年 8

月 22 日、26 日、27 日、28 日和 9 月 22 日、23 日、24 日、25 日共计 8 d,早上 8:00 至晚上 22:00,每隔 2 h 采集 1 次生活污水样品。采集的污水样品当天带回附近的中国科学院南京土壤研究所溧池工作站实验室进行水化学分析。

为了获得试验点生活污水产生量,在采集污水样品的同时,利用旋杯式流速仪测定污水流速。由于主排水沟渠是水泥构筑物,形状规则,截面积均匀一致,采样时于取水点处设置刻度尺,在读取污水流速的同时读取水深。由污水流速、水深和沟底宽度换算污水流量。

1.3 样品分析方法

水质各项指标依照国家标准中的水样化学分析方法分析^[3],包括总氮(TN)、总磷(TP)、生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD_{Cr})、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、水溶磷(DP)、溶解氧(DO)。TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;TP 采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法;COD_{Cr} 采用重铬酸盐法测定;NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法测定;DP 采用钼酸铵比色法测定;DO 采用碘量法测定。

1.4 污染总量计算方法

质量负荷(mass loadings)的单位一般采用 kg·d⁻¹, 可以下面的数学式来表示^[14]:

$$M=C \times Q \times 10^{-6}$$

式中: M 为质量负荷,kg·d⁻¹; C 为进流浓度,mg·L⁻¹; Q 为流量,L·d⁻¹。在本文的计算中,污染物浓度 C 取多次采样平均值或者多点平均值; Q 取多次测量值的平均值。

2 结果与分析

2.1 研究区典型村镇生活污水水质特征

在整个 0.63 km² 的研究区域内,从 2006 年 8 月至 2007 年 8 月连续采集生活排水沟渠中的生活污水样品,其污染物浓度分析结果总结如表 1。

由结果可以看出,生活污水中溶解氧含量较低,稳定在 3.1~3.3 mg·L⁻¹,说明水质较差。pH 值 6.7~8.3,

表 1 研究区村镇生活污水中污染物浓度特征(mg·L⁻¹)Table 1 The concentration of pollutants in rural domestic wastewater in the study spot(mg·L⁻¹)

项目	TN	TP	COD _{Cr}	NH ₄ ⁺ -N	DP	NO ₃ ⁻ -N	BOD ₅	TSS	DO	pH
范围	24.0~237.9	2.10~37.87	270~1 629	15.4~183.0	0.70~12.06	0.36~11.67	118~342	251~969	3.1~3.3	6.7~8.3
均值	118.9	9.75	781	71.7	6.73	3.86	232	630	3.2	7.4

与城镇生活污水相当。研究区村镇生活污水中悬浮固体含量高, TSS 平均浓度为 $630 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度变异范围 3~4 倍, 生活污水中悬浮物含量高于四川岷江流域农村生活污水^[15], 与刘忠翰等在滇池流域农业区的研究结果有相同之处^[16], 这可能与不同地区农村居民生活方式、排水方式有关。研究区内村镇生活污水通过明渠收集后就近排入入湖河道, 短程收集系统导致污水中悬浮物随季节变化, 并受地表状况影响。BOD₅ 平均浓度为 $232 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较城市污水低, 这是由于研究区内部分小型工业作坊排水进入居民生活污水排水沟渠, 影响到污水的可生化性。N、P 和 COD_{Cr} 指标浓度变异较大, 变化范围达 6~32 倍, 且各项污染物浓度含量都很高, 与农村生活污水分类中黑水(粪便冲洗水中 COD 300~600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 100~300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮 >30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP >3.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的浓度接近^[17]。其中以 NO₃⁻-N 浓度变异范围最大, 最大值与最小值相差 31 倍。TN 浓度变异范围达到近 10 倍, 浓度是《地表水环境质量标准 GB 3838—2002》中地表 V 类水 TN 规定浓度的 12~119 倍, 均值达到 118.9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污染十分严重。TP 浓度最高值是最低值的 18 倍, 其最低值也接近地表 V 类水 TP 规定浓度的 5 倍。

有研究表明, 高浓度的 NH₄⁺ 是城市生活污水和农村人畜排泄物的特征, 高浓度的 PO₄³⁻ 主要来自生活污水及动物排泄物^[18]。研究区内生活污水中 NH₄⁺-N 的平均浓度高达 71.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DP 浓度达 6.73 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明区域内生活污水受到了人畜排泄物的影响, 污染严重。这与我们调查中的发现是相一致的, 研究区内抽水马桶的普及率达 40%, 粪尿随其他的生活排污进入排水明渠。许海等在太湖上游部分地区的研 究也表明, 农村居民区的生活污水影响了受纳水体的水质, 典型的特点就是铵态氮负荷较高^[19]。

研究区生活污水中 COD_{Cr} 270~1 629 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度达 781 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 接近于钟森芳报道的福州市餐饮类废水的 COD_{Cr} 浓度^[20], 是三峡库区临江村镇生活污水的 1.5~9 倍^[21]。BOD₅ 118~342 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度高达 232 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。BOD₅/COD_{Cr} 比值为 0.15~0.49, 仅 6% 的情况下部分 BOD₅/COD_{Cr} 比值高于 0.4, 可生化性差, 需要进行预处理才能达到生化处理工艺的要求。这与太湖流域宜兴农村生活污水和广东省农村生活污水的水质情况不同, 这些地区生活污水 BOD₅/COD_{Cr} 比值在 0.40~0.55 之间, 可生化性好^[22-23]。

研究区生活污水中 TN、TP 浓度分别达到 118.9、9.75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均高于文献中报道的小城镇生活污水以

及城市生活污水中的氮、磷浓度, 是番禺市市桥镇城镇生活污水的 3~4 倍, 是武汉黄孝河地区城市生活污水的 4 倍左右^[24-25]。这与刘忠翰等在滇池流域的研究结果相同, 滨湖地区农村生活污水中通常含有人畜粪尿成分, 污水中 N、P 含量特别是磷含量高于城市污水, TP 高达 18.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[16]。COD_{Cr}/TN 比值 4~12, 均值为 7.62, 约 87% 的样品 C/N 比值低于 10。高浓度 N、P 的存在是研究区生活污水治理的难题。

研究区内生活污水处理工程的选择必须考虑适宜的前处理工艺, 例如粪便污染物所含的 COD、N、P 比例最大, 截留粪便将使得水体污染物浓度大大降低^[17,26]; 去除高浓度的悬浮物质, 将会降低污水中大量以颗粒态形式存在的无机化合物, 降低 N、P 含量, 提高 BOD₅/COD_{Cr} 比值, 改善污水的可生化性。通过预处理工艺或措施, 减低生活污水的污染物浓度, 以期适应自然处理技术的低负荷要求, 并且可以降低处理设施占地面积, 满足分散处理系统的要求。

2.2 生活污水水质动态变化特征

2.2.1 生活污水中污染物浓度日变化特征

试验点生活污水排放量和生活污水中 TN、TP、COD_{Cr}、NH₄⁺-N、DP、NO₃⁻-N 的浓度在全天内的变化特征如图 2 所示。可以看出, TN 和 NH₄⁺-N 在一天内的变化趋势较为一致, 都呈现出早晨最高, 然后逐渐降低, 在下午 16:00 达到谷值, 之后又逐渐上升。TP 和 DP 在一天内的变化趋势较为接近, 早晨 8:00 浓度最高, 然后逐渐降低, 在下午 16:00 到达谷值, 之后逐渐上升, 至 18:00 后又缓缓下降。COD_{Cr} 和 NO₃⁻-N 一天内波动幅度相对较小, 分别在中午 12:00 达到最高值, 在下午 18:00 又有一个峰值。

Butler 等的研究结果^[27]表明, 不同生活设施对生活污水的质量和数量影响是不同的。厕所排放废水对生活污水组成成分影响程度最大, 特别是铵盐含量高, 排放时间集中在晚上, 占夜间排放量的 60%~90%; 厨房洗碗废水中正磷酸盐比例高, 排放高峰出现在早上 6:00—7:00 和晚上 18:00—22:00。这与我们的研究结果是相符合的: 研究点生活污水中 NH₄⁺-N 的排放早上 8:00 和晚上 22:00 有两个峰值, 早起上班人员、打工族以及大量的家庭旅馆租住人员必然会使厕所卫生废水在早晨有一个高峰排放现象; DP、TP 的排放峰值是在早上 8:00 和晚上 18:00—20:00, 这与居民生活习惯是相吻合的。当地日出时间较晚, 上班时间普遍为 9:00, 这导致 NH₄⁺-N、DP、TP 在早上的峰值比文献中排放高峰期出现的晚。

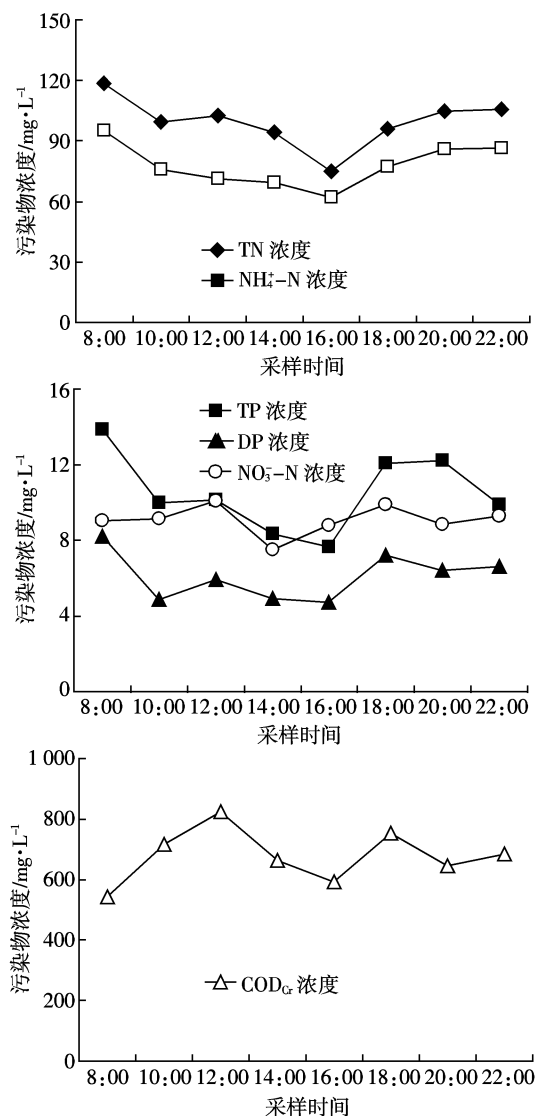


图2 生活污水中污染物浓度全天动态变化曲线

Figure 2 Dynamic change of pollutant level in sanitary sewage within a day

研究点内生活污水中 COD_{Cr} 浓度很高, 在 $544 \sim 824 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 浓度一天内的波动范围不大, 分别在 12:00 和 18:00 有两个峰值, 下午 16:00 出现最低值。这与张德刚等的研究结果不同: 张的研究结果表明 COD_{Cr} 浓度高峰出现在上午 9:00、中午 13:00 和夜晚 22:00, 低谷出现在清晨 7:00 和傍晚 18:00^[28]。这可能与研究时间段的不同有关, 张等的研究是 3—4 月, 为当地的旱季, 而我们的结果是 8—9 月, 是当地的雨季。

2.2.2 生活污水中污染物浓度周变化特征

连续 8 d 的采样可以分为 4 个工作日和 4 个周末, 依此分类统计研究点排放的生活污水中污染物的浓度(表 2)。无论是工作日还是周末, 生活污水中污染物 TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DP 和 COD_{Cr} 浓度都很高, 且接近表 1 中整个研究区域生活污水的平均浓度, 说明研究点的居民生活排污具有较好的代表性。

显著性差异分析表明, TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DP 污染物的平均浓度在工作日和周末没有显著性差异, 且波动幅度不大。这与张德刚等在滇池流域城郊村镇的研究结果相同, 基本反映了滇池流域典型城郊村镇居民的生活习惯^[29]。研究点工作日生活污水中 COD_{Cr} 浓度显著高于周末, 一方面是因为当地集市大多设于周一、周三、周五, 街面洗肉水、小吃废水等在集市日排放集中而周末相对减少; 另一方面, 研究点内打工人员聚集, 周末休息大多进城消费或者出玩, 也使得出租房和饭店等周末的排污比平时要有所降低。不同的是, 张德刚等在滇池城郊村镇的研究结果表明, 生活污水中 COD_{Cr} 浓度在一周内工作日和非工作日的变化差异不显著^[28]。这说明, 生活污水中 COD_{Cr} 的周变化在不同季节是不同的。

2.2.3 生活污水中污染物浓度的全年变化特征

在研究区域内进行的连续 1 a(2006 年 8 月—2007 年 8 月)的生活污水水质监测发现, TN、TP、 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DP 浓度在不同月份之间变化差异明显, 且全年波动较大, 如图 3 所示。TN、TP、 COD_{Cr} 浓度在一年内的总体变化趋势相同, 从 2006 年 12 月至 2007 年 4 月污染物浓度较高; 在 2006 年 8 月到 10 月和 2007 年 5 月到 8 月之间污染物浓度总体上有所下降。 NO_3^--N 的浓度变化趋势则是相反的, 在 2006 年 8 月到 10 月和 2007 年 5 月到 8 月之间污染物浓度较高, 而从 2006 年 11 月至 2007 年 4 月污染物浓度则下降很多。研究区域内生活污水中 NH_4^+-N 、DP 浓度全年变化波动较大, 且随季节、月份变化的趋势不明显。根据以往的研究结果, 生活污水中 NH_4^+-N 、DP 浓度变化与居民经济条件、生活习惯、作息规律等关系密切^[27], 经济条件好、生活水平高、肉类蛋白类食物比例高的居民家庭, 冲厕废水中 NH_4^+-N 含量增加,

表 2 生活污水中污染物浓度周变化特征($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)Table 2 Dynamic changes of the pollutant level in sanitary sewage within a week($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

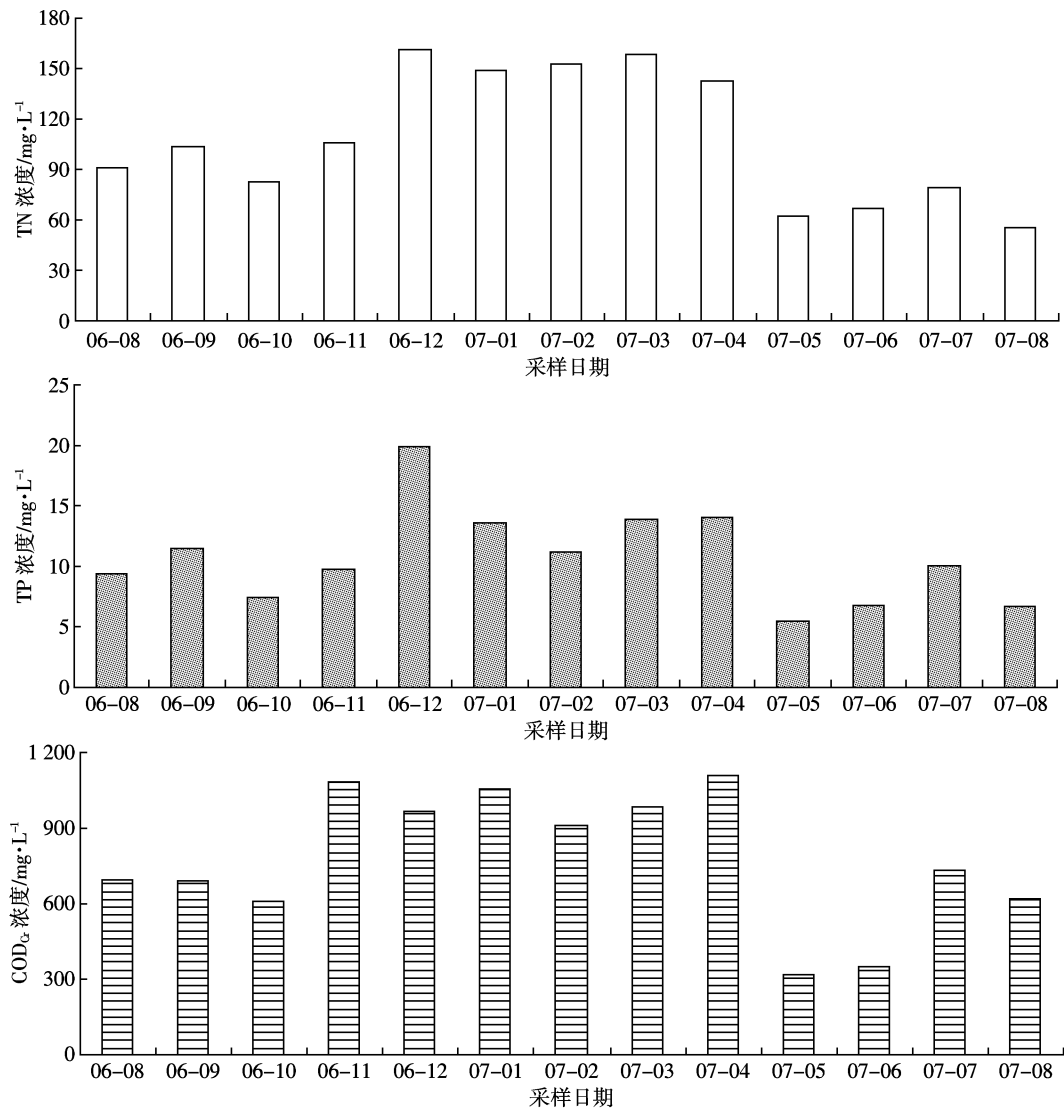
项目	TN	TP	NH_4^+-N	NO_3^--N	DP	COD_{Cr}
工作日	97.6 ± 25.8	10.80 ± 1.34	74.4 ± 17.06	9.14 ± 3.17	5.90 ± 1.25	777 ± 175
周末	98.9 ± 11.5	10.23 ± 2.34	73.5 ± 12.75	9.04 ± 2.12	6.31 ± 2.05	579 ± 104

洗涤剂的大量使用会引起生活污水中 DP 浓度的增高。此外,研究区附近农田面积较广,由于施肥带来的大气中 NH_3 含量高,大气 NH_3 干沉降、大气氮素湿沉降都会增加地表水体中 NH_4^+-N 的含量^[30-32]。研究区域附近农业种植以韭菜为主,农田全年无休,一年 6~8 季,氮肥施用量高;加上当地四季如春,也就使得化肥通过氨挥发的形态进入大气中的时间段较为分散,且全年都有发生。由此,大气氮干湿沉降的时间段也分散于各个月份,这也使得开放明渠中生活污水中 NH_4^+-N 浓度在雨季和旱季的变化趋势并不明显。

由图 3 可以看出,研究区域生活污水中 COD_Cr 浓度从 2007 年 3、4 月到 5、6 月有明显的下降趋势,这与张德刚等提出的 COD_Cr 浓度在 3—6 月 4 个月之间总体差异不大的研究结果不同^[28]。当地雨季集中在 5—10 月,雨季降雨量集中了全年降雨量的 85%~95%,11 月至次年 4 月为旱季^[33]。雨季初期的降雨会

对研究区内的排水明渠产生较大的冲刷作用,带走相当量的沟渠底泥,有助于生活污水在沟渠中沉积,降低了污水中污染物的浓度。另一方面,研究区村镇建设缺乏统一的规划,雨污混流,大量的雨水进入排水沟渠会对沟渠中的生活污水产生稀释效应,导致雨季生活排污浓度降低。同时,雨水的冲刷和大量地表径流的汇入也是导致生活区排污水中 NO_3^--N 浓度在雨季有大幅上升的原因。这与谢迎新等在常熟地区的研究结果相同,丰水期大量雨水冲刷作用使得各种生活污水、畜禽排泄物及露天粪坑的人排泄物随同径流等进入附近主河道水体,而使得夏季河湖水体 NO_3^--N 浓度较高^[34]。也有研究推测,夏季生活污水中 NO_3^--N 浓度较高,是由于气温较高,硝化作用强,导致大量的 NO_3^--N 产生累积作用^[35]。

对照图 3 中雨季和旱季污染物浓度,在 2007 年雨季监测中,生活污水中各污染物浓度从雨季初期 5 月



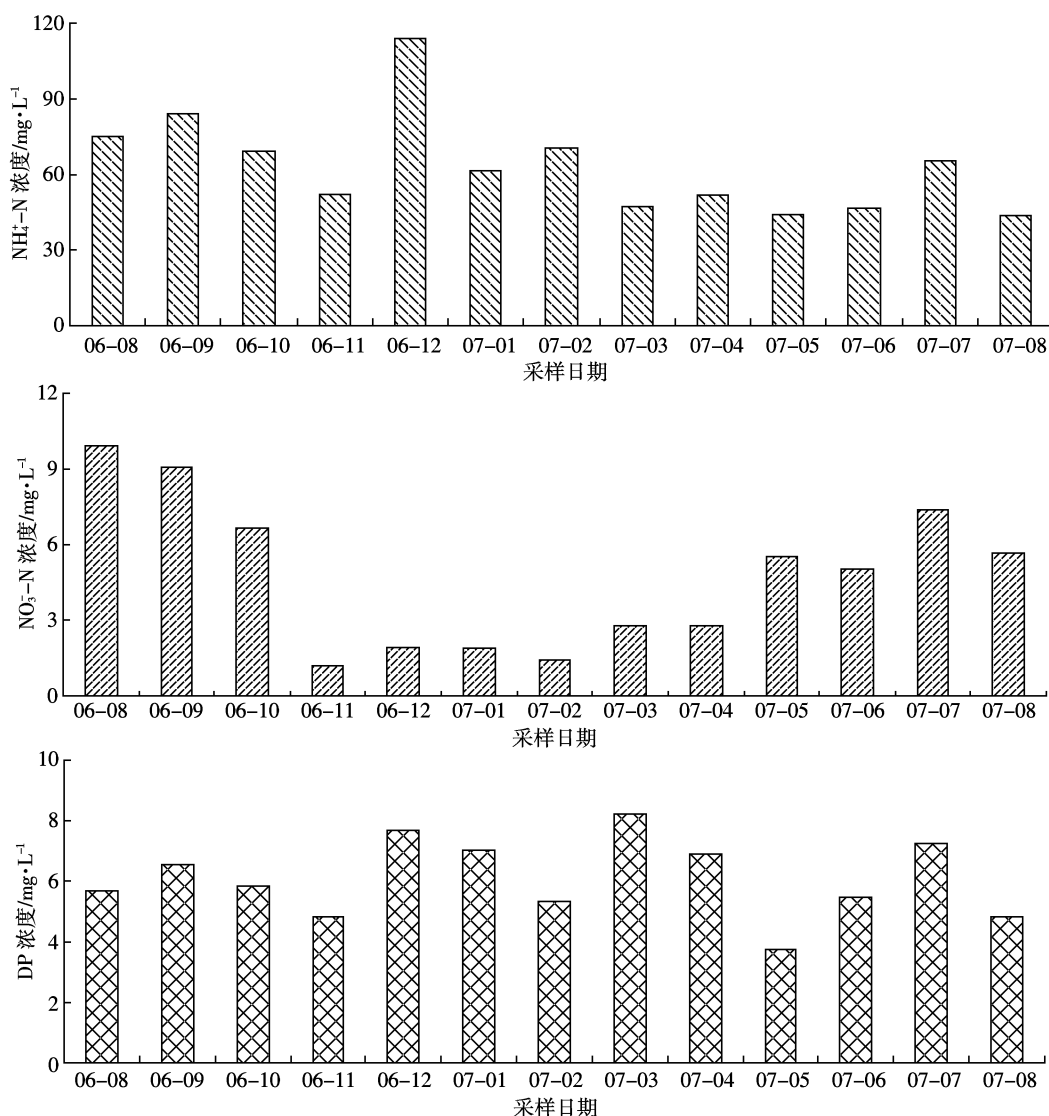


图3 生活污水中污染物浓度的全年变化特征

Figure 3 The annual change of pollutants level in sanitary sewage

份开始逐渐升高,雨季中期7月份污染物浓度显著高于雨季初期污染物浓度。而TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N在雨季末期9、10月份浓度高于雨季初期和中期;COD_{Cr}、TP、DP浓度在雨季中期浓度最高。陈鸿烈等在台湾的研究表明,农村社区生活废水的电导率、BOD、有机氮、凯氏氮及总氮的平均浓度按雨季初期、中期、末期的顺序而升高,COD、氨氮、硝态氮、亚硝态氮及总磷,以雨季中期污染值最高^[36],这与我们的研究结果中雨季TN、TP、COD_{Cr}浓度的变化规律是一致的。

3 讨论

3.1 研究区域村镇生活污水排放量

根据前期的调查分析发现,当地居民生活用水来源广,包括自来水、桶装水、井水、河水4种来源;桶装

水用于日常饮用水,自来水为日常餐饮、洗漱用水,井水、河水用于冲厕所和拖地板等。研究区域内自来水普及率为100%,旱季人均每日自来水用量为42 L,占全部用水量的60%左右。按照城市排水工程规划规范(GB 50318—2000),城镇生活污水排放系数为0.7~0.9;研究区域内地表硬化率高,且生活污水通过已有的排污明渠直接进入大清河,故取研究区内生活污水排放系数为0.8,则研究区内旱季人均每日生活污水排放量为56 L。生活排污动态监测结果表明:雨季研究点内平均每日污水产生量为39.59 m³·d⁻¹,人均每日污水排放量约为99 L·人⁻¹·d⁻¹。

当地生活污水人均排放量高于滇池流域一般的农村地区人均每日25~35 L的生活污水排放量^[37-38];也高于经济条件较好的太湖流域的浙江农村和宜兴

农村人均每日 63.6~70 L 的排放量^[22,39];接近于粤西北等靠近西江水源丰富的农村人均 94 L·人⁻¹·d⁻¹ 的排污量^[23]。这与当地经济条件好,家庭旅馆较多,用水量较大,并且排水管道相对完善有关。说明当地生活排污水平已经接近于城市,但由于缺乏统一规划和市政设施建设,生活污水污染严重,对环境的影响也比较大。在苏南一些经济较为发达的农村地区,由于城镇化水平高人口密集导致生活污染负荷高,生活污水已经成为当地最主要的非点源污染^[40]。

3.2 研究区域村镇生活污水中污染物排放总量

由上述分析可知,研究区旱季、雨季生活污水中各种浓度差异显著;调查和监测的结果也表明当地旱季气温较低居民生活污水用量减少,生活污水排放量也就降低,而雨季高温期生活污水排放量较高。由此,根据研究结果将旱季和雨季生活污水排污量分别计算,并按照人口比例推算出整个 0.63 km² 的研究区域村镇生活污水中污染物的排放量(表 3)。

由表 3 可以看出,研究区域的村镇内,雨季人均每日总氮排放量约为 9.64 g·人⁻¹·d⁻¹,总磷排放量为 1.01 g·人⁻¹·d⁻¹,分别是滇池流域其他村镇生活污水中 N、P 排放量的 31.6 倍和 16.6 倍^[38]。这是因为研究区居民抽水马桶使用率高,人粪尿混入生活排污水中,而文献中的村镇居民多使用旱厕且粪尿单独清运。研究区城镇化水平高,也导致人均排污系数高于典型农村地区的排污系数,如太湖流域典型农村武进市雪堰镇农民生活污水污染排放量为总氮 2.24 g·d⁻¹·人⁻¹、氨氮 1.44 g·d⁻¹·人⁻¹、总磷 0.158 g·d⁻¹·人⁻¹^[41-42]。人均污染排放负荷雨季为总氮 3.52 kg·a⁻¹,总磷 0.37 kg·a⁻¹,旱季为总氮 2.96 kg·a⁻¹,总磷 0.28 kg·a⁻¹。这个值低于世

界银行报告的人均总氮 4.0 kg·a⁻¹、总磷 1.0 kg·a⁻¹ 的排放量^[43]。研究区域人均每年总氮、总磷排污负荷是九龙江流域农村生活污水中污染物人均总氮排放量的 2.2 倍和 2.4 倍,九龙江流域农村污染负荷低也是因为当地粪便单独清运,降低了生活污水中污染物的含量^[44]。雨季人均 COD_{Cr} 排放量为 68.88 g·人⁻¹·d⁻¹,旱季为 56.96 g·人⁻¹·d⁻¹,雨季 NH₄⁺-N 排放量为 7.62 g·人⁻¹·d⁻¹,旱季为 3.70 g·人⁻¹·d⁻¹,全年排污负荷均高于水利部农村生活污水中 COD_{Cr} 50 g·人⁻¹·d⁻¹、氨氮 3.2 g·人⁻¹·d⁻¹ 的排放系数^[45],也说明了当地处于城郊,经济条件好于一般农村地区,生活排污浓度高,污染负荷大。

研究区的城郊村镇生活污水来源的污染物单位面积每年排污负荷 TN 为 203.81 kg·hm⁻²,TP 为 20.48 kg·hm⁻²,NH₄⁺-N 为 130.16 kg·hm⁻²,NO₃⁻-N 为 11.59 kg·hm⁻²,生活污染负荷远低于张德刚等报道的研究结果^[46]。这是因为本文所选的研究点人口密度较大,达到 1 253 人·hm⁻²;但是所选的 3 个城郊型村庄的大研究区内村镇人口密度则相对较低,约为 63 人·hm⁻²。城郊型村镇典型的特点之一就是保有农村和城市双重特点,局部区域(商业化居民区)内人口密度较大,而部分靠农田区(普通居民区)人口密度小,分布很不均匀。由此,城郊村镇生活污水的排放量应该按照小区与大区人口比例来计算能反映具体的区域生活污水污染负荷,仅按照面积比例计算会夸大流域污染负荷。

对照雨季和旱季排污,雨季人均生活排污负荷、单位面积排污负荷都大于旱季排污负荷;从排污总量上看,雨季生活排污总量也远远大于旱季,这与雨季

表 3 研究区生活污水中污染排放总量
Table 3 The pollution emissions quantity of sanitary sewage in the research area

项目		TN	TP	COD _{Cr}	NH ₄ ⁺ -N	DP	NO ₃ ⁻ -N
雨季	人均负荷/g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹	9.64	1.01	68.88	7.62	0.59	0.89
	排污负荷/kg·人 ⁻¹ ·d ⁻¹	3.52	0.37	25.14	2.78	0.21	0.33
	单位面积负荷/kg·hm ⁻²	111.4	11.75	796.67	88.10	6.83	10.32
	排污总量/t	7.02	0.74	50.19	5.55	0.43	0.65
	占全年比例%	54.67	57.36	55.15	67.68	61.43	89.04
旱季	人均负荷/g·人 ⁻¹ ·d ⁻¹	8.12	0.77	56.96	3.70	0.37	0.11
	排污负荷/kg·人 ⁻¹ ·d ⁻¹	2.96	0.28	20.79	1.35	0.14	0.04
	单位面积负荷/kg·hm ⁻²	92.38	8.73	647.94	42.06	4.29	1.27
	排污总量/t	5.82	0.55	40.82	2.65	0.27	0.08
	占全年比例/%	45.33	42.64	44.85	32.32	38.57	10.96
全年总排污量/t		12.84	1.29	91.01	8.20	0.70	0.73
全年单位面积负荷量/kg·hm ⁻²		203.81	20.48	1 444.60	130.16	11.11	11.59

生活污水排放量大有关。尤其是雨季人均 NO_3^- -N 排污负荷是旱季的 8 倍, 雨季生活污水中 NO_3^- -N 排放量占全年排放总量的 89.04%; 雨季生活污水中 NH_4^+ -N、DP 排放量是旱季排放量的近 2 倍。雨季成为生活污水中可溶性无机盐 NH_4^+ -N、DP 和 NO_3^- -N 排放的主要季节, 也是污染控制的关键季节。

4 结论

(1) 研究区生活污水的水质特征是 TN、TP、 COD_Cr 浓度高, $\text{BOD}_5/\text{COD}_\text{Cr}$ 比值和 $\text{COD}_\text{Cr}/\text{TN}$ 比值低, 需经适当的前处理提高污水的可生化性。

(2) 生活污水中污染物排放的日变化特征是: 在早上 8:00 和晚上 18:00 以后浓度较高, 而污染物排放通量以及污水排放量的高峰时段是上午 10:00 和晚上 20:00; 工作日生活污水中 COD_Cr 浓度显著高于周末。雨季生活污水中污染物浓度低于旱季, 但生活污水排放量则远远大于旱季, 导致雨季污染物排放量高于旱季。雨季是生活污水中可溶性无机盐 NH_4^+ -N、DP 和 NO_3^- -N 排放的主要季节, 也是污染控制的关键季节。

(3) 研究区人均每日 TN 排放量约为 $8.88 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, TP 排放量为 $0.89 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, COD 排放量为 $62.92 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 城郊村镇人均生活污染排放量较高, 生活排污水平已经接近于城市。

参考文献:

- [1] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴—2009 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
Kunming Statistics Bureau. Kunming statistical annual—2009[M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2009.
- [2] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008–1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008–1017.
- [3] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策. III. 中国农业面源污染控制中存在的问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026–1033.
ZHANG Wei-li, XU Ai-guo, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies III. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1026–1033.
- [4] XING Guang-xi, CAO Ya-cheng, SHI Shu-lian, et al. N pollution sources and denitrification in waterbodies in Taihu Lake region [J]. *Science in China (Series B)*, 2001, 44(3): 304–314.
- [5] 张凯松, 周启星, 孙铁珩. 城镇生活污水处理技术研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(5): 5–10.
ZHANG Kai-song, ZHOU Qi-xing, SUN Tie-heng. Advances in treatment technology of urban domestic wastewater[J]. *World Sci-tech Research and Development*, 2003, 25(5): 5–10.
- [6] 张增胜, 杨耀芳, 徐功娣, 等. 农村生活污水分散处理技术研究进展[J]. 污染防治技术, 2008, 21(6): 65–67.
ZHANG Zeng-sheng, YANG Yao-fang, XU Gong-di, et al. Research progress on technology for decentralized treatment of rural domestic sewage[J]. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(6): 65–67.
- [7] 李无双, 王洪阳, 潘淑君. 农村分散式生活污水现状与处理技术进展[J]. 天津农业科学, 2008, 14(6): 75–77.
LI Wu-shuang, WANG Hong-yang, PAN Shu-jun. Present status on decentralized domestic sewage in rural areas of China and its treatment technology[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2008, 14(6): 75–77.
- [8] Eugenio Foresti, Marcelo Zaiat, Marcus Vallero. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2006, 5: 3–19.
- [9] Farzin Y H, Kaplan J D. Nonpoint source pollution control under incomplete and costly information[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2004, 28: 489–506.
- [10] 陈国喜, 周启星. 恒液位推流式 BSBR 工艺工程设计研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(3): 273–277.
CHEN Guo-xi, ZHOU Qi-xing. Constant level plug-flow BSBR process and engineering research [J]. *Journal of Basic and Engineering Sciences*, 2000, 8(3): 273–277.
- [11] 金相灿, 辛玮光, 卢少勇, 等. 入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 52–56.
JIN Xiang-can, XIN Wei-guang, LU Shao-yong, et al. Effect of polluted inflow river on water quality of lake bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 52–56.
- [12] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴—2008[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
Kunming Statistics Bureau. Kunming statistical annual—2008[M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2008.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China. Inspection and analytical approach for water and wastewater[M]. Fourth Edition. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [14] Tchobanoglous G, Burton F L. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse[M]. Third Edition. New York: Metcalf and Eddy Inc, 1979.
- [15] 张鑫, 付永胜, 范兴建, 等. 农村生活污水排放规律及处理方法分析[J]. 广东农业科学, 2008(8): 139–142.
ZHANG Xin, FU Yong-sheng, FAN Xing-jian, et al. The sewage of village life disposal rule and processing method research[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2008(8): 139–142.

- [16] 刘忠翰, 彭江燕. 滇池流域农业区排水水质状况的初步调查[J]. 云南环境科学, 1997, 16(2):6-9.
LIU Zhong-han, PENG Jiang-yan. Primary investigation of water quality of the agricultural area in the Dianchi Lake catchment[J]. *Yunnan Environmental Science*, 1997, 16(2):6-9.
- [17] 王焕升, 王凯军, 崔志峰, 等. 中国农村地区生活污染调查及控制模式探讨[J]. 中国给水排水, 2008, 24(20):20-22, 30.
WANG Huan-sheng, WANG Kai-jun, CUI Zhi-feng, et al. Investigation of domestic pollution in rural areas in China and discussion on its control mode[J]. *China Water and Wastewater*, 2008, 24(20):20-22, 30.
- [18] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. 土壤学报, 2001, 38(4):540-545.
XING Guang-xi, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. Situation of nitrogen pollution in water bodies in Suzhou region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4):540-545.
- [19] 许海, 刘兆普, 焦佳国, 等. 太湖上游不同类型过境水氮素污染状况[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1):43-49.
XU Hai, LIU Zhao-pu, JIAO Jia-guo, et al. Nitrogen pollution status of various types of passing-by water bodies in upper reaches of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(1):43-49.
- [20] 钟森芳. 福州市区生活污水排放现状调查与解决对策初探[J]. 福建工程学院学报, 2004, 2(3):320-321, 325.
ZHONG Sen-fang. Current status of the drainage of municipal domestic sewage in Fuzhou and countermeasures[J]. *Journal of Fujian University of Technology*, 2004, 2(3):320-321, 325.
- [21] 方芳, 王磊, 郭劲松, 等. 三峡库区典型临江村镇排放污水的水质水量特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8):1661-1668.
FANG Fang, WANG Lei, GUO Jin-song, et al. Characteristics of domestic wastewater quality and quantity discharged from typical villages and small towns by the riverside in Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8):1661-1668.
- [22] 徐洪斌, 吕锡武, 李先宁, 等. 农村生活污水(太湖流域)水质水量调查研究[J]. 河南科学, 2008, 26(7):854-857.
XU Hong-bin, LV Xi-wu, LI Xian-ning, et al. Investigation on village sewage pollution in the zone of Tai Lake [J]. *Henan Science*, 2008, 26(7):854-857.
- [23] 凌霄, 杨细平, 陈满, 等. 广东省农村生活污水治理现状调查[J]. 中国给水排水, 2009, 25(8):8-10, 15.
LING Xiao, YANG Xi-ping, CHEN Man, et al. Investigation on present situation of rural domestic sewage treatment in Guangdong Province[J]. *China Water and Wastewater*, 2009, 25(8):8-10, 15.
- [24] 吴群河, 陈炳禄. 珠江三角洲城镇污水的水质特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 37(2):191-193.
WU Qun-he, CHEN Bing-lu. Quality of the sewage in Pearl River Delta[J]. *Journal of Zhongshan University (Natural Science)*, 2001, 37(2):191-193.
- [25] 张翔凌, 姜应和, 叶舟, 等. 武汉黄孝河地区城市污水水质特征分析[J]. 市政技术, 2007, 25(2):128-133.
ZHANG Xiang-ling, JIANG Ying-he, YE Zhou, et al. Characteristic analysis of urban sewage quality of Huangxiaohu area in Wuhan[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2007, 25(2):128-133.
- [26] 张大弟, 张晓红, 章家骥, 等. 上海市郊区非点源污染综合评价[J]. 上海农业学报, 1997, 13(1):31-36.
ZHANG Da-di, ZHANG Xiao-hong, ZHANG Jia-qi, et al. Synthesis investigation appraisal for non-point source pollution of suburb in Shanghai[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1997, 13(1):31-36.
- [27] Butler D, Friedler E, Gatt K. Characterizing the quantity and quality of domestic wastewater inflows[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 1(7):13-24.
- [28] 张德刚, 汤利, 陈永川, 等. 滇池流域典型城郊型村镇排放污水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. Characteristics of chemical oxygen demand and total suspended solid discharged household wastewater from typical suburb regions in Dianchi Lake catchments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1446-1449.
- [29] 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. Discharge rule and character of nitrogen and phosphorus in household wastewater from suburb typical region in Dianchi Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2245-2250.
- [30] Michopoulos P, Baloutsos G, Economou A, et al. Effect of nitrogen deposition on nitrogen cycling in an Aleppo pine stand in Athens Greece[J]. *Science Total Environ*, 2004, 323:211-218.
- [31] 王小治, 朱建国, 高人, 等. 太湖地区氮素湿沉降动态及生态学意义:以常熟生态站为例[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9):1616-1620.
WANG Xiao-zhi, ZHU Jian-guo, GAO Ren, et al. Dynamics and ecological significance of nitrogen wet-deposition in Taihu Lake region-taking changshu agro-ecological experiment station as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9):1616-1620.
- [32] XIE Y X, XIONG Z Q, XING G X, et al. Source of nitrogen in wet deposition to a rice agroecosystem at Tai Lake Region [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(21):5182-5192.
- [33] 《中国农业全书》总编辑委员会主编.《中国农业全书—云南卷》[M]. 北京:中国农业出版社, 2001.
“Chinese Agricultural Pandect” Editorial Committee. Chinese agricultural pandect, Yunnan volume[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [34] 谢迎新, 邢光熹, 熊正琴, 等. 常熟地区河湖水体的氮污染源研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):766-771.
XIE Ying-xin, XING Guang-xi, XIONG Zheng-qin, et al. Sources of nitrogen pollution in water bodies of rivers and lakes in Changshu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):766-771.
- [35] 苏曼丽, 赵言文, 胡正义, 等. 太湖流域农村污水污染特征研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7):176-179.
SU Man-li, ZHAO Yan-wen, HU Zheng-yi, et al. Study on pollution characteristics of rural wastewater in Tai Lake region[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(7):176-179.
- [36] 陈鸿烈, 曾安新, 梁家柱. 台湾农村生活废水之水质特性及其影响

- 研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(3): 100-105.
- CHEN Paris-Honglay, TSENG An-Hsin, LIANG Jia-Chu. Evaluation of water quality and influence from domestic wastewater[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(3): 100-105.
- [37] 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 and Wastewater Engineering*, 2004, 30(7): 34-36.
- [38] 刘志强, 苗 群, 邵长飞, 等. 滇池流域村镇生活污水污染及处理技术[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2003, 24(1): 13-17.
- LIU Zhi-qiang, MIAO Qun, SHAO Chang-fei, et al. Pollution and treatment techniques of wastewater from villages and towns in Dianchi Lake valley[J]. *Journal of Qiangdao Institute of Architecture and Engineering*, 2003, 24(1): 13-17.
- [39] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- Zhejiang Province Statistics Bureau. Zhejiang statistical annual [M]. Beijing: Chinese Statistics Publishing House, 2006.
- [40] 叶 飞, 卞新民, 胡大伟, 等. 江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J]. 水资源保护, 2006, 22(6): 86-88.
- YE Fei, BIAN Xin-min, HU Da-wei, et al. Regional difference and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(6): 86-88.
- [41] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国, 等. 太湖流域非点源氮污染对水质影响的量化研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 150-153.
- GUO Hong-yan, WANG Xiao-rong, ZHU Jian-guo, et al. Quantity of nitrogen from non-point source pollution in Taihu Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(2): 150-153.
- [42] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国. 太湖一级保护区非点源磷污染的量化研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 136-140.
- GUO Hong-yan, WANG Xiao-rong, ZHU Jian-guo. Quantification of non-point sources phosphorus pollution in key protection area of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 136-140.
- [43] World Bank. Towards improved management of environmental impacts. Environmental Sector Study. Washington D C, USA, 1993.
- [44] 陈能汪, 张珞平, 洪华生, 等. 九龙江流域农村生活污水污染定量研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊): 249-253.
- CHEN Neng-wang, ZHANG Luo-ping, HONG Hua-sheng, et al. Estimates of household wastewater loads from Jiulong River watershed[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43(Sup.): 249-253.
- [45] 水利部水利水电规划设计总院, 全国水资源综合规划技术工作组. 全国水资源综合规划地表水水质评价及污染物排放量调查估算工作补充技术细则[R]. 2003, 65.
- The Ministry of Water Conservation, Water Conservation and Water and Electricity Plan Designs the Main Hospital, the National Water Resources Unified Plan Technology Work Team. National water resources unified plan surface water quality appraisal and pollutant discharge amount investigation estimate work supplement technology regulation[R]. 2003, 65.
- [46] 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, 252.
- 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, 252.