

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 05. 023

白洋淀养鸭废水水质组成及其扩散和消减特征

马牧源¹, 崔丽娟¹, 张曼胤¹, 朱 峻², 于一雷¹

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091;
2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:为了保护白洋淀生态环境,合理规划养殖规模与范围,通过夏、冬两季对鸭养殖区及周边水样的采集、测试,结合 Suffer 软件分析,对白洋淀鸭养殖区水质的时空变化、扩散和消减特征进行研究。结果表明:鸭养殖区水质超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水标准,主要污染物为 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD,质量浓度分别为 9.51 ~ 14.20、0.92 ~ 1.77、7.33 ~ 9.06 和 54.10 ~ 83.45 mg/L,夏季污染物浓度显著高于冬季;养殖废水在淀区南部消减效果明显优于北部,这主要是由于南部地区水面开阔,水生植物分布面积广,有利于湖泊的自净作用的发挥。养鸭废水中铜的消减效率最高,夏冬两季的削减效率分别为每 km 15.5% ± 11.0% 和 14.8% ± 12.9%,硝酸盐的消减效率最低,夏冬两季分别为每 km 8.7% ± 5.8% 和 5.0% ± 4.3%,养鸭废水消减效率与扩散距离呈负相关关系,铜的消减效率随扩散距离的增加下降最快,硝酸盐最慢。

关键词:养鸭废水;水质分析;营养盐;重金属;白洋淀

中图分类号:X832 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2017)05 - 0145 - 09

Water quality composition of duck farm wastewater in Baiyangdian Lake and its diffusion and reduction characteristics

MA Muyuan¹, CUI Lijuan¹, ZHANG Manyin¹, ZHU Jun², YU Yilei¹

(1. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Combined with Suffer software analysis and by collecting and testing water samples in duck breeding area and surrounding water in two seasons of summer and winter, this paper studied the spatial-temporal variations in the water quality in the duck farms and its diffusion & reduction characteristics of the wastewater in Baiyangdian Lake in order to protect the ecological environment of Baiyangdian and reasonably plan the scale and range of duck breeding. The results showed that the water quality of duck breeding area were worse than class V of *Surface Water Environmental Quality Standard* (GB3838—2002), the main pollutants were total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen and chemical oxygen demand; the concentrations of these pollutants were 9.51 ~ 14.20 mg/L, 0.92 ~ 1.77 mg/L, 7.33 ~ 9.06 mg/L and 54.10 ~ 83.45 mg/L, respectively. And the pollutant concentration in summer was significantly higher than that in winter. The reduction effect of duck farm wastewater in the south of Baiyangdian Lake area is obviously better than that in North, mainly because the southern part of the lake has a wide surface of water and a wide distribution of aquatic plants, which is beneficial for the self purification of the Lake. The reduction efficiency of copper was the highest, 15.5%/km ± 11.0%/km in summer and 14.8%/km ±

基金项目:中国林业科学研究院林业新技术所基本科研业务费专项(CAFINT 2013K06);中国林业科学研究院院所基本科研业务费专项(CAFYBB2014QB050);国家自然科学基金(41401615)

作者简介:马牧源(1981—),女,助理研究员,博士,主要从事湿地恢复与水污染治理研究。E-mail:xiaogu67@126.com

通信作者:于一雷,助理研究员。E-mail:yuyilei@caf.ac.cn

12.9%/km in winter respectively. and the reduction efficiency of nitrate was the lowest, 8.7%/km $\pm$ 5.8%/km in summer and 5.0% $\pm$ 4.3%/km in winter respectively. The reduction efficiency of main pollutants decreased with the diffusion distance, which means the reduction efficiency of copper decreased fastest with the increase of diffusion distance while the nitrate was the slowest.

Key words: duck farm wastewater; water quality analysis; nutrient; heavy metal; Baiyangdian Lake

白洋淀是我国华北地区典型的浅水型湖泊,由143个淀泊及3700多条沟壑组成,水域面积约占淀区面积的50%,被誉为“华北之肾”和“华北明珠”。白洋淀的大面积污染是从20世纪80年代开始的,在1988年干淀重新蓄水前,白洋淀水质优于或等于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水。自20世纪80年代以来,由于气候变化和人类活动的影响,入淀天然径流量逐年减少,白洋淀水量急剧减少,干淀现象频繁发生,1988年重新蓄水初期,白洋淀水质较好,为Ⅲ类水,主要污染物为COD、 NH_4^+ -N和TP,平均质量浓度分别为4.9、0.17、0.29 mg/L^[1],重金属不是白洋淀的主要污染物,只有少量检出,且不超过Ⅲ类水标准^[2]。但随着社会经济的发展,工业、农业和生活污染物的入淀负荷量增加,导致白洋淀水质恶化,面临较为严重的水体富营养化问题。其中,农业面源污染中富含氮磷的畜禽粪便一直是水体营养盐污染负荷的重要输入源^[3]。白洋淀的畜禽养殖以鸭养殖业为主,占淀内畜禽养殖的99%以上。根据安新县畜牧水产局统计,2005—2009年安新县白洋淀地区共有鸭存栏128.7万只,其中淀内养鸭存栏36.8万只左右。白洋淀鸭养殖模式主要以小型养殖户散养为主,养殖规模小,养殖户分散,养殖模式主要包括湖心岛养殖模式和沿堤外养殖模式两种^[4],鸭场由鸭舍、活动场地和水面3部分组成,鸭白天在活动场地和水面活动,可自由下水,夜晚赶回鸭舍,鸭排泄物排放具有随机性和不确定性。该地区粪便无害化和资源化处理严重落后,一般仅为简单堆砌后随雨水冲刷或人工冲扫排入淀区水体,因此鸭粪入湖量受天气和人为干扰的影响。据估算,白洋淀鸭粪排放量约为40 200 t/a,其中TN、TP、和 NH_4^+ -N分别为1 389.75 t/a、498.64 t/a和34.85 t/a,铜(Cu^{2+})和锌(Zn^{2+})的排放量为1.50 t/a和9.46 t/a^[5]。养殖废水中的COD、 NH_4^+ -N不断升高,使湖泊水体不断发黑、变臭;饲料中滥用重金属,部分残留随粪便一起排入淀区,这些重金属通常结构稳定、可降解性差,可长期滞留在水环境中,并通过迁移、转化、富集或食物链传递危及水生生物及人类健康。本文对养鸭废水的组成、扩散规律及消减特征进行定量研究,旨在为合理规划鸭养殖容量、科学设置养殖区域以及养殖污

染治理提供必要的依据,也为畜禽养殖的环境影响评价提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集和测试

根据现场调查以及鸭养殖区的空间分布,共布设20个采样点(图1)。鸭养殖区内并不存在其他污染源,其余采样点也都设置在远离居住区及航道区域,以避免其他污染对实验结果的干扰。2014年夏季(7月)和冬季(11月),分别进行样品采集,现场采用溶氧仪测定DO。按照《水和废水监测分析方法(第四版)》规定采集样品,在4℃条件下冷藏保存,并在24 h内完成实验室水质分析。其中COD采用重铬酸钾法测定,TN用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP用钼锑抗分光光度法测定, NH_4^+ -N采用纳氏试剂光度法测定, NO_3^- -N采用酚二磺酸分光光度法测定, Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 采用原子吸收分光光度法测定,Chl-a采用热乙醇反复冻融分光光度法测定。

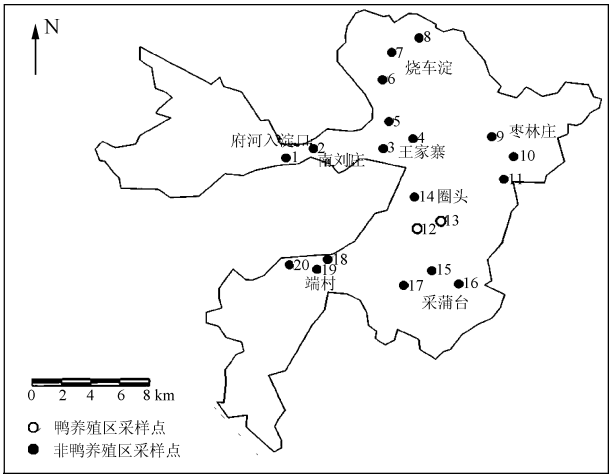


图1 白洋淀区位及采样点分布图

1.2 数据分析方法

本次调查中两个鸭养殖区的养殖规模分别为6 000只(采样点12)和1 000只(采样点13),由于采样点12的养殖规模更大,且在相对上游的区域,因此以采样点12为原点,以东西方向为X轴、南北方向为Y轴建立坐标系,分别计算各采样点的污染物消减效率,并采用suffer软件对白洋淀养鸭废水的污染物浓度和消减效率进行作图。污染物消减效

率 R 计算公式为

$$R = \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0 L} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为每 km 污染物削减效率,%; ρ_0 为坐标原点处营养盐或重金属的质量浓度,mg/L(营养盐)或 $\mu\text{g/L}$ (重金属); ρ_i 为采样点处营养盐或重金属浓度,mg/L(营养盐)或 $\mu\text{g/L}$ (重金属); L 为采样点到原点的距离,km。

2 结果与分析

2.1 养鸭废水水质时空分布

2.1.1 营养盐

淀区内亚硝酸盐(NO_2^- -N)在不同季节无显著差异($p = 0.16$)。鸭养殖区内夏季水体中的 TN, NH_4^+ -N,硝酸盐(NO_3^- -N)和 TP 都显著高于冬季(表 1, $p < 0.05$),而其他区域的水体中只有 TP 在夏季的质量浓度显著高于冬季,而氮的不同形态之间无显著差异。这主要是由白洋淀的鸭养殖周期决定的,种鸭养殖一般在 5—6 月,出栏期一般为 10 月,冬季时鸭养殖数量明显减少,导致营养盐输入量也明显降低。白洋淀鸭养殖区水体中的 TN, NH_4^+ -N 和 TP 均超过了地表水环境质量 V 类水标准。在三态无机氮中又以 NO_3^- -N 质量浓度最高, NO_2^- -N 质量浓度最低。

除 NO_2^- -N 外,其他营养盐分布均呈现出质量浓度由养鸭区域向周边逐渐降低的趋势(图 2)。TN, NH_4^+ -N 和 TP, NO_3^- -N 质量浓度都在鸭养殖区(采样点 12,13)最高,在枣林庄(采样点 11)最低。鸭养殖区内的营养盐显著高于非养殖区,这主要是因为鸭饲料和鸭粪中含有大量的氮、磷,尤其是高浓度的 NH_4^+ -N、有机氮和无机磷^[6-7]。在鸭养殖过程中,饲料中仅有不足 50% 的氮、磷可以被鸭子吸收利用,而未被利用的营养盐随着鸭粪排入水体后残留在沉积物中^[8]。而沉积物中的磷极易发生流失,会重新向上覆水释放,其流失率可高达 35% ~ 60%^[9]。府河入口附近(采样点 1,2)的营养盐质量浓度也都较高:TN, NH_4^+ -N, NO_3^- -N 和 TP 的质量浓度夏季分别为 8.60,6.11,2.23 和 0.98 mg/L,冬季分别为 7.11,5.21,1.73 和 0.41 mg/L,仅低于养殖区,这主要是由于白洋淀承接保定市区的污水造成的。通过府河排入白洋淀的生活污水及处理后的工业废水量高达 269 000 t/d^[10],因此,府河来水是白洋淀区营养盐过高的另一主要原因。图 3 中,箭头方向反映营养盐的扩散路径,箭头长度反映营养盐消减程度的大小。可以看出,白洋淀中营养盐扩散路线主要有两条:一条在北部,箭头方向主要为由西向东、进入较为开阔区域后部分箭头指向北侧,在最西

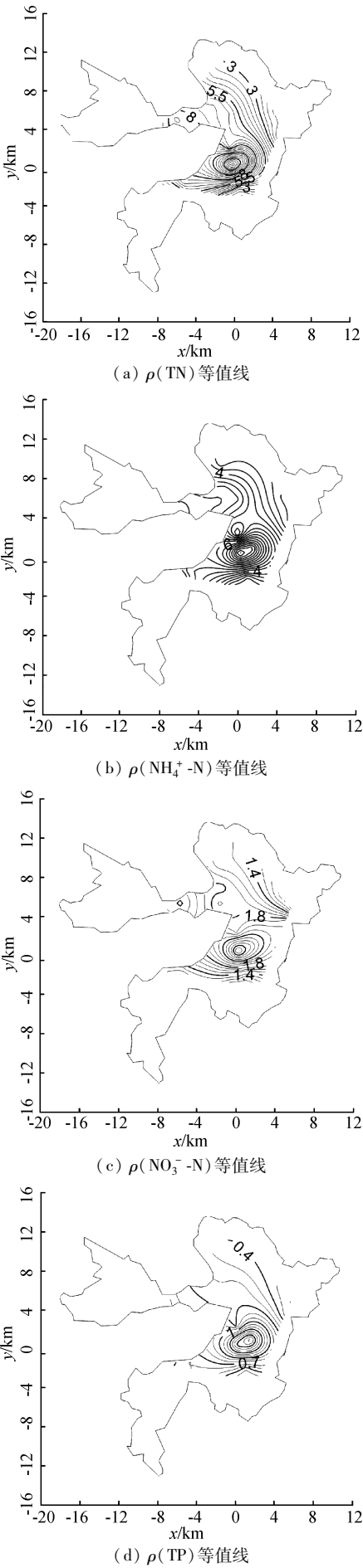


图 2 白洋淀夏季水体中营养盐浓度等值线(单位:mg/L)

表1 白洋淀养鸭废水相关水质参数季节变化

季节	区域	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
夏季	养鸭区域	14.20 ± 2.26 ^a	9.06 ± 0.53 ^a	2.69 ± 0.24 ^a	0.004 ± 0.001 ^a	1.77 ± 0.16 ^a
夏季	其他区域	4.34 ± 2.63 ^c	4.03 ± 1.68 ^c	1.51 ± 0.39 ^c	0.005 ± 0.001 ^a	0.52 ± 0.22 ^c
冬季	养鸭区域	9.51 ± 0.63 ^b	7.33 ± 0.41 ^b	1.79 ± 0.07 ^b	0.005 ± 0.001 ^a	0.92 ± 0.06 ^b
冬季	其他区域	5.39 ± 1.23 ^c	3.21 ± 1.23 ^c	1.34 ± 0.29 ^c	0.005 ± 0.001 ^a	0.22 ± 0.11 ^d

季节	区域	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Chl-a})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cu}^{2+})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Zn}^{2+})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
夏季	养鸭区域	83.45 ± 5.87 ^a	2.71 ± 0.56 ^a	140.85 ± 15.91 ^a	40.0 ± 0.0 ^a	111.2 ± 15.41 ^a
夏季	其他区域	37.87 ± 13.66 ^c	7.345 ± 1.80 ^b	57.86 ± 23.07 ^b	22.0 ± 5.10 ^b	45.18 ± 14.06 ^c
冬季	养鸭区域	54.10 ± 1.70 ^b	3.595 ± 0.61 ^a	53.10 ± 5.37 ^b	35.0 ± 7.0 ^a	74.20 ± 20.36 ^b
冬季	其他区域	25.69 ± 9.84 ^c	8.69 ± 1.56 ^b	18.21 ± 10.76 ^c	6.0 ± 9.0 ^c	29.74 ± 6.12 ^d

注:上标字母不同表示差异显著($P < 0.05$),字母相同表示差异不显著($P \geq 0.05$)。

侧水道较为狭长的地带,向量的长度较短,进入开阔区域后向量长度有所增加且长度相似,这表明在淀区北部,营养盐主要由西向东、向北两方向扩散,且营养盐的消减程度在开阔区域较狭长地带有所增加;另一条在南部,箭头方向由原点向四周扩散,在靠近原点的区域向量长度较外围更长,这表明营养盐由养殖区向四周扩散,初期消减效果更好,随着扩散距离的增加,消减效果有所降低。两条扩散线路相比,淀区南部营养盐消减效果要明显优于北部,这主要是因为白洋淀南部水面开阔、水生植物分布面积广,有利于湖泊自净作用的发挥。

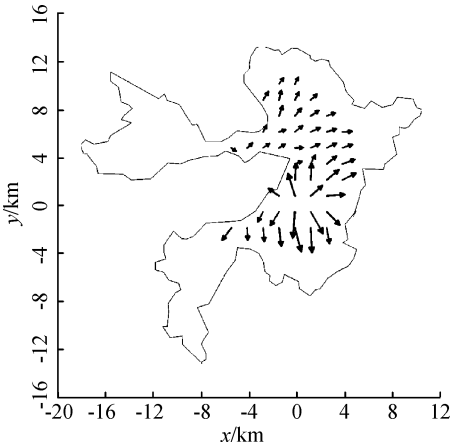
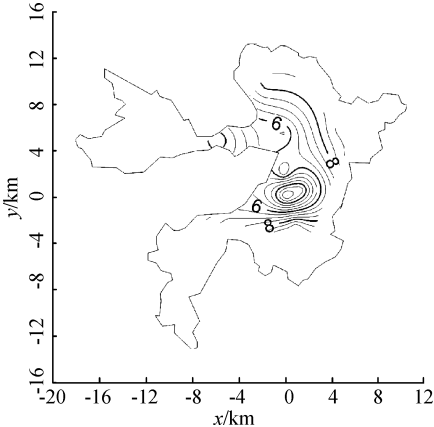


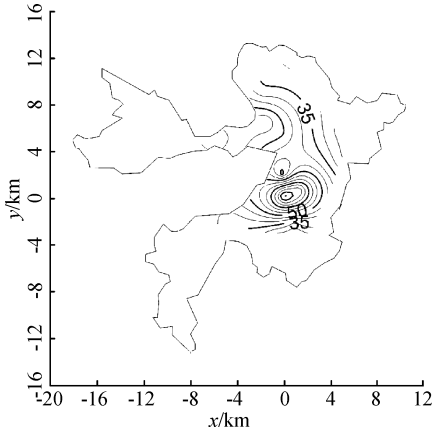
图3 白洋淀夏季水体中营养盐扩散向量图

2.1.2 有机污染和叶绿素 a

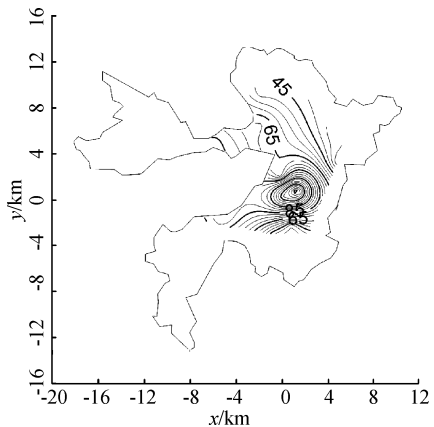
DO 和 COD 是衡量有机污染的重要指标。白洋淀鸭养殖区水体中的 COD 超过了地表水 V 类水标准,DO 超过了 IV 类水标准。夏季,养鸭区的 $\rho(\text{DO})$ 最低值为 2.31 mg/L,随与养殖区距离的增加水体的溶解氧质量浓度不断升高,其中采样点 17 的 $\rho(\text{DO})$ 最高值为 9.45 mg/L; $\rho(\text{COD})$ 由养殖区最高值 87.60 mg/L 下降至采样点 17 的 22.30 mg/L(图 4(a),(b))。冬季,DO 和 COD 的空间变化趋势与夏季基本一致。水体中叶绿素 a 可以反映湖泊的富营养化水平。白洋淀夏季养鸭区域叶绿素 a 质量浓度最高,达到 152.10 mg/L,叶绿素 a 质量浓度在采样点 17 最低,仅有 24.60 mg/L(图 4(c))。综合有机



(a) $\rho(\text{DO})$ 等值线



(b) $\rho(\text{COD})$ 等值线



(c) $\rho(\text{Chl-a})$ 等值线

图4 白洋淀夏季水体中 DO、COD 和 Chl-a 的质量浓度等值线图(单位:mg/L)

污染分布情况,绘制出白洋淀区有机污染扩散向量图,见图5。从图5可以看出,淀区有机污染扩散规律与营养盐基本一致,呈现出南、北两条扩散线路,且南部有机污染消减效果好于北部。与营养盐的扩散规律略有不同的是,南部的西侧存在由西向东的有机污染物扩散,这表明除了府河来水、圈头的畜禽养殖,端村的水产养殖也是白洋淀区有机污染的来源之一。

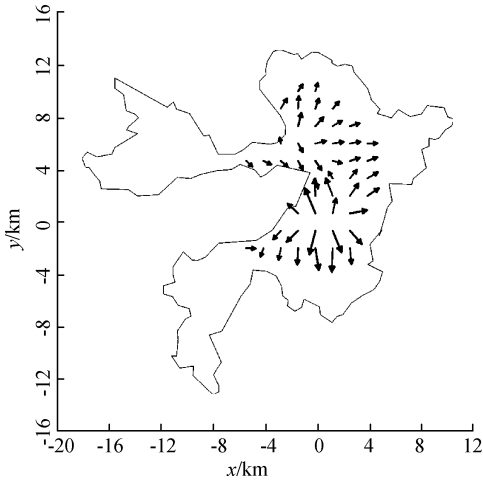
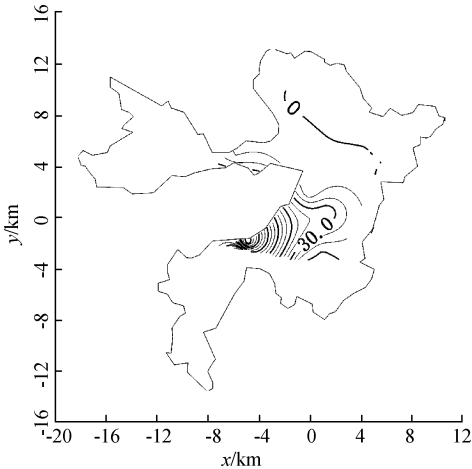


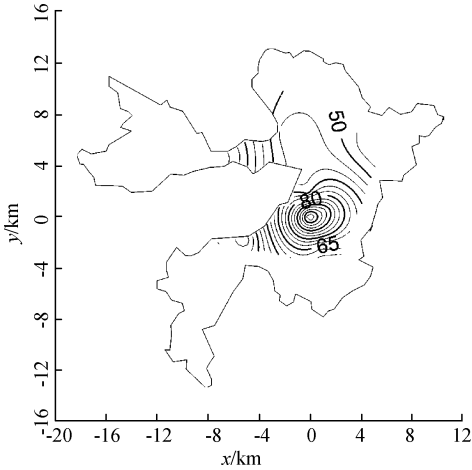
图5 白洋淀夏季水体中有机污染扩散向量图

2.1.3 重金属

饲料中的高铜含量可以促进动物生长、提高饲料的利用率,而高锌对疾病控制和动物发育有较好作用^[11],因此鸭养殖过程中多使用高铜、高锌的饲料,但这些重金属对水体产生危害。据调查,我国畜禽养殖的饲料中添加的 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 质量比分别为 $\text{nd} \sim 392.1$ 和 $15.9 \sim 2041.8 \text{ mg/kg}$, 畜禽粪便中的 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 质量比更可达到为 $8.4 \sim 1726$ 和 $39.5 \sim 11379 \text{ mg/kg}$ ^[12]。白洋淀水体中 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 都处在较低水平,优于地表水环境质量Ⅱ类水标准。夏季养殖区 Cu^{2+} 质量浓度为 $40.0 \text{ }\mu\text{g/L}$,此外仅在端村(采样点18—20)和府河入淀口(采样点1)检出了 Cu^{2+} ,其余各采样点均未检出; Zn^{2+} 质量浓度为 $20.20 \sim 122.1 \text{ }\mu\text{g/L}$,最低处位于南刘庄(采样点2),消减率为83.5%(图6);冬季水体中 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的空间分布规律与夏季相同,只是质量浓度更低,冬季养殖区的 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的质量浓度分别为 $35.0 \text{ }\mu\text{g/L}$ 和 $74.2 \text{ }\mu\text{g/L}$ 。与2007—2008年数据^[13]相比,白洋淀水体中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 分布较为相似,质量浓度略有增加。由图7可以看出,箭头方向为由原点向四周扩散,向量长度随着扩散距离的增加而逐渐减少。这表明白洋淀重金属与有机污染和营养盐的扩散规律不同,是由养殖区向周围扩散,且随扩散距离的增加,污染物消减效率明显降低。与府河相比,鸭养殖污染中的重金属对淀区的影响更大,因此可判断畜禽养殖是白洋淀重金属的主要来源。



(a) $\rho(\text{Cu}^{2+})$ 等值线



(b) $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 等值线

图6 白洋淀夏季水体中重金属浓度等值线图
(单位: $\mu\text{g/L}$)

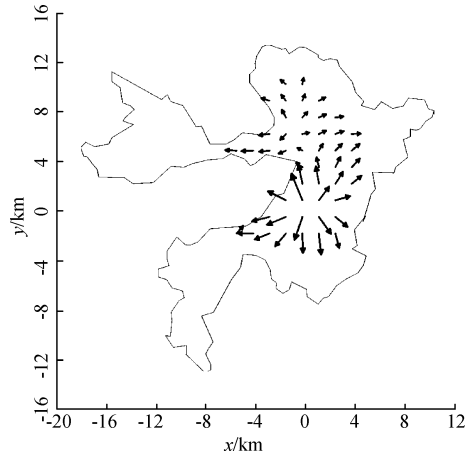


图7 白洋淀夏季水体中重金属扩散向量图

2.2 白洋淀鸭养殖区与其他养殖水体水质对比

从表2可以看出,与2009年白洋淀鸭养殖区水质相比,2014年鸭养殖区水质呈明显恶化的趋势。TN,TP和COD分别增长了4.68,5.00和0.27倍, Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 也分别增长了3.00和1.47倍。这种增长主要是由养殖规模的变化引起的。2009年,白洋淀湖心岛鸭养殖以小规模为主,约为1500只。

表 2 不同畜禽养殖水体中的污染物质量浓度

水体	养殖类型	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cu}^{2+})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Zn}^{2+})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	文献来源
白洋淀(2009 年)	鸭	2.5	0.8	0.3	6.8	65.6	10.0	45.0	[5]
白洋淀(2014 年)	鸭	14.2	9.1	1.8	2.7	83.5	40.0	111.2	本研究
滇池	鸭	1.5	1.4	—	4.5	18.0			[14]
信阳畜禽园	鸭	—	5.1~6.4	—	—	235.0~270.0			[15]
惠州基塘系统	鱼、鸭	2.0~7.9	1.2~4.0	0.3~0.6	3.0	75.0~112.0	31.0~51.0	43.0~55.0	[16]
埃及池塘	鱼、鸭		0.2	0.2					[17]
太湖流域	畜禽	—	—	—	—	3 873.5			[18]

近年来由于鸭养殖利润降低,在市场的自发调节作用下,白洋淀鸭养殖格局发生变化,小而多的分散养殖逐步被少但大的集中养殖取代,本次调查中养殖区鸭养殖规模约为 6 000 只。除了污染物浓度,养鸭废水的组成也有明显变化。根据 Liebig 最小值定律,当水体中的氮磷比大于 7 时,磷可能是湖泊中藻类生长的限制性营养盐^[19]。2014 年养殖区水体中的氮磷比为 7.9,虽与 2009 年的 8.3^[5]相比略有降低,但仍为磷营养限制型水体。 NH_4^+-N 是水体中的主要耗氧污染物,对鱼虾等水生动物有毒害作用, NH_4^+-N 的增加反映养鸭废水毒性的增强。 NH_4^+-N 与 TN 的比例也一定程度上可以反映出水体的自净能力,当 NH_4^+-N 与 TN 比例较高时,说明水体中的溶解氧不足,因而好氧细菌不能把有机物彻底分解为硝酸盐等稳定化合物,从而残留较高的 NH_4^+-N 。相比于 2009 年,2014 年养殖区水体中 NH_4^+-N 增长了 10.4 倍, NH_4^+-N 与 TN 的比值也增长了 1 倍,说明鸭养殖废水对湖泊的生态风险明显增大,水体的自净能力也在下降。

各养鸭水体的污染物浓度差异较大,这可能与养殖区环境、养殖类型、养殖规模、养殖方式密切相关。与其他鸭养殖水体相比,白洋淀的氮、磷远远高于其他水体,COD 质量浓度含量也处在较高的水平,这主要是因为白洋淀无害化处理和资源化处理方式严重落后,鸭粪处理方式为全部清扫入淀,给水体造成严重污染,富营养化问题十分突出。

2.3 养鸭废水水质消减效率

2.3.1 时空变化特征

不同季节的 TN 和 NO_3-N 的消减效率具有显著差异($p < 0.05$),TN 的夏季和冬季消减效率分别为每 km (13.3 ± 8.6)% 和 (8.5 ± 6.2)%, NO_3-N 的夏季、冬季消减效率分别为每 km (8.7 ± 5.8)% 和 (5.0 ± 4.3)%。其余各参数在两个季节没有显著差异,其中 TP、叶绿素 a、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 都在冬季时消减效率略高,TP 在夏冬两季消减效率分别每 km 为 (12.6 ± 8.9)% 和 (13.9 ± 9.4)%,叶绿素 a 夏季、冬季的消减效率分别每 km 为 (10.9 ± 8.2)% 和

(12.8 ± 9.4)%, Cu^{2+} 夏冬两季的消减效率分别每 km (14.8 ± 12.9)% 和 (15.5 ± 11.0)%, Zn^{2+} 夏冬两季的消减效率分别每 km 为 (11.0 ± 5.5)% 和 (12.8 ± 8.5)%,而 COD 和 NH_4^+-N 的消减效率则在夏季略高, NH_4^+-N 夏冬两季的消减效率分别为每 km (10.7 ± 8.8)% 和 (10.6 ± 8.1)%,COD 在夏冬两季的消减效率分别每 km (10.6 ± 8.2)% 和 (9.7 ± 8.1)%。许多研究都表明水温越高,水体中污染物的自净能力越强^[20-22],但本研究中养鸭废水中只有 TN 和 NH_4^+-N 的消减效率在夏季更高,其余各水质参数在夏冬两季的消减效率差异不显著。TP、Chl-a、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的消减效率在冬季略高,这主要是污染物的降解受到水体中溶解氧和微生物组成的共同影响。白洋淀水体中虽然冬季微生物总量虽有所减少,但冬季的溶解氧要高于夏季,在二者共同作用下,养鸭废水的污染物消减效率在冬夏两季差异不显著。

白洋淀上游有众多的河流,下游有泄洪出口,但近年来华北地区干旱少雨,许多河流已常年断流。因此,从整个区域来看,白洋淀是一个相对封闭的水体。华北地区常年多风,冬季多西北风,夏季多东南风,是典型的暖温带大陆性季风气候。白洋淀的出口位于枣林庄附近,在淀区的东北侧,因而夏季风向与水流方向呈反方向。风力对养鸭废水在水体中的混合稀释不利,因此,在污染物达到自净前进一步扩大了污染物的污染范围。根据马寨璞等^[23]对白洋淀水循环特点的研究,鸭养殖区所在位置在冬季易产生下降流,会增强污染物向深层输运,而夏季出现上升流,会把底泥中的污染物带入表层水体中,再加之夏季鸭子活动对水体的扰动进一步增强,这都会导致夏季养鸭区水体污染强度增加和污染范围扩大。

养鸭废水各水质参数消减效率在空间上呈现基本相同的特征,各采样点水质参数的消减效率具有显著差异($p < 0.05$),这与各采样点的地形、植被和污染物浓度等因素密切相关。从图 8 可以看出,各水质参数的消减效率在采样点 15—18(圈头和采蒲台)出现峰值,两个低点分别出现在 1,2(府河入淀

口)和7,8(烧车淀)附近。这是因为圈头和采蒲台水生植物分布面积广,大量的挺水和沉水植物能有效去除水体中的有机污染物。根据刘超等^[24]的研究,芦苇湿地对鸭粪废水中的 COD 具有很好的去除效果,去除率可达 57.76%。而北部监测点(府河入淀口、烧车淀等)主要受府河来水影响,且北部内水道相对狭窄,水深较浅,水生植物分布较南部少,因此污染物消减效率相对较低。总体看,南部地区污染物消减效率较高(大于等于每 km 20%),水体自净能力较强;而且北部地区污染物消减效率较低(小于等于每 km 10%),水体自净能力不足,不宜进行水禽养殖,且亟须对该区域进行污染治理和生态恢复。

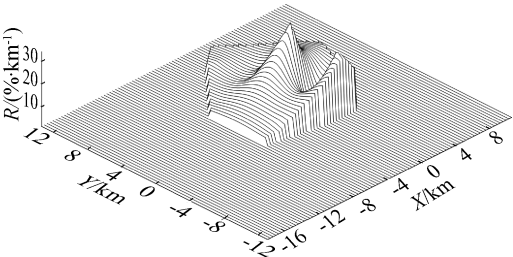
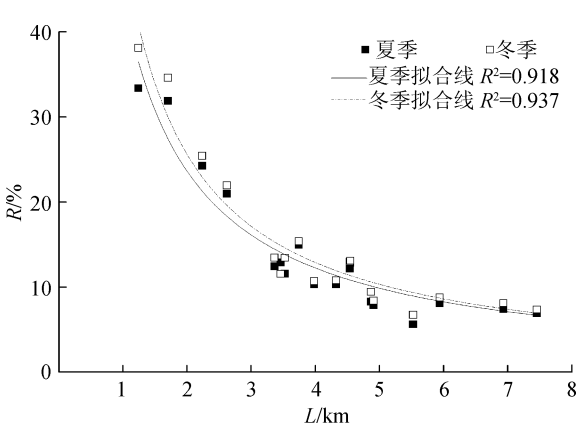


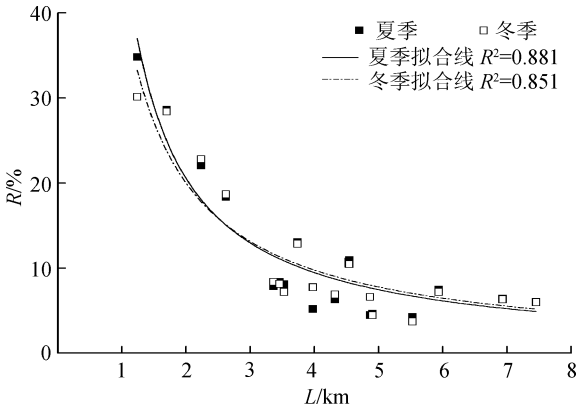
图 8 养鸭废水消减效率的空间分布特征示意图(原点为采样点 12,X 轴表示东西方向,Y 轴表示南北方向,Z 轴为消减效率(R))

2.3.2 与扩散距离的关系

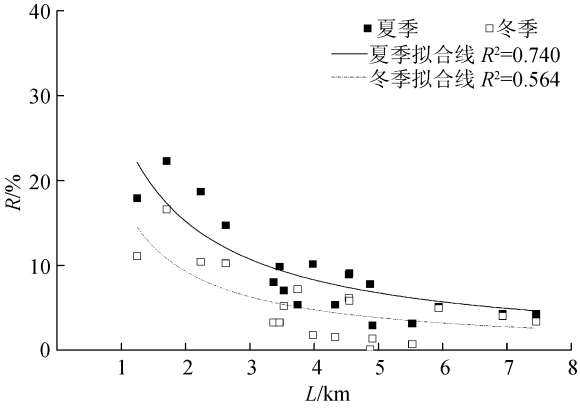
养鸭废水水质消减效率与扩散距离关系见图 9。从图 9 可以看出,养鸭废水水质消减效率与扩散距离呈负相关关系,8 个水质参数的消减效率均随着与鸭场距离的增加而降低($p < 0.05$),在 3 km 后消减效率降低速度有所减缓,除 Zn^{2+} 以外,其余水质参数的消减效率在 6 km 外消减效率均有所提高。随着扩散距离的增加,污染物负荷逐渐降低,去除率也随之降低,这与刘超等^[24-25]研究结果一致。8 个参数中, Cu^{2+} 的消减效率随扩散距离的增加下降最快,硝酸盐最慢,这是因为 Cu^{2+} 的溶解度低,在偏碱性环境中已形成沉淀,已从水体中去除,而硝酸盐在水中溶解度高,稳定性好,难于形成共沉淀或吸附,因此较难通过水体的自净作用去除。



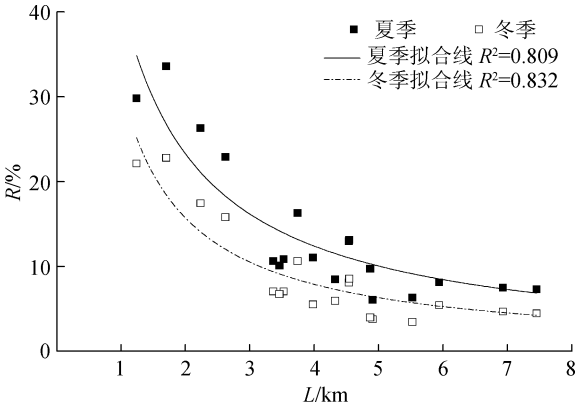
(b) TP



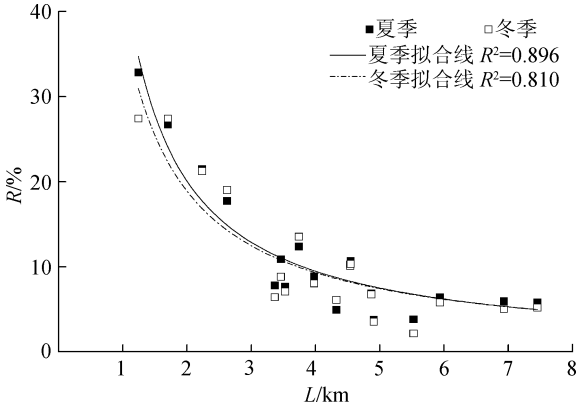
(c) NH_4^+-N



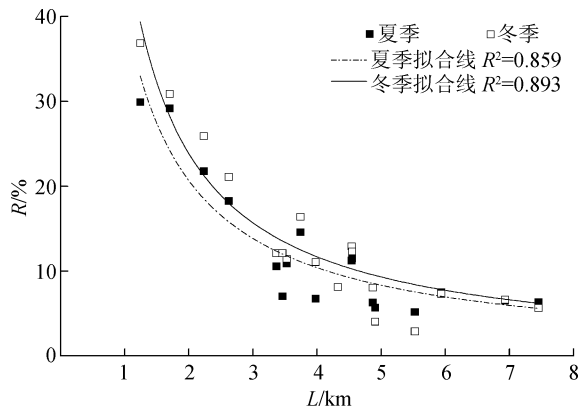
(d) NO_3^--N



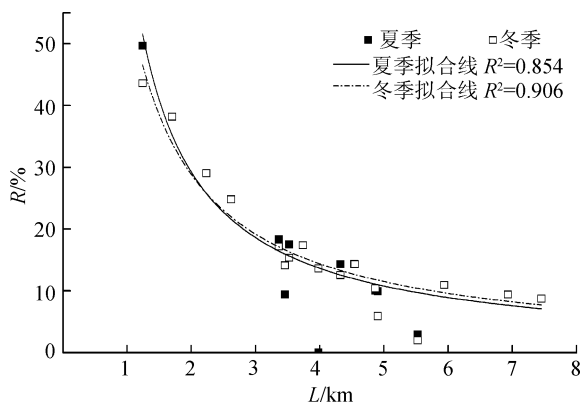
(a) TN



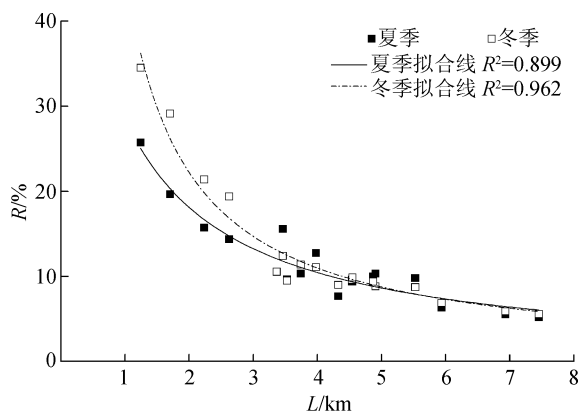
(e) COD



(f) Chl-a



(g) Cu²⁺



(h) Zn²⁺

图9 养鸭废水每 km 消减效率与距污染源距离的关系

白洋淀地区目前的养殖方式以及粪便无害化处理方式落后的现状,使得该区域水体污染十分严重。因此亟须从源头、过程和末端治理 3 方面对白洋淀地区鸭养殖产业进行科学管理。首先,合理引导淀区养殖业,在数量、密度上加以限制,以保证鸭养殖废水排放浓度不会超出水体的自净能力;其次,改进饲养模式,减少残料(未摄食的饲料)产生量和化学品、消毒剂等的使用量,以控制养殖过程中氮、磷、重金属的排放;再次,对鸭粪进行收集,采用堆肥、鸭粪沼气池等方式进行无害化、资源化处理,提高鸭粪的利用率,从而减少鸭养殖对淀区水体污染的范围。

3 结 论

a. 白洋淀鸭养殖区的营养盐、有机污染、重金属都显著高于非养殖区,其中 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 是白洋淀养鸭废水的主要污染指标,超过地表水环境质量 V 类水标准。白洋淀鸭养殖污染程度夏季显著高于冬季,鸭养殖区的 TN、TP、NH₄⁺-N 和 COD 质量浓度,夏季分别为 14.20, 1.77, 9.06 和 83.45 mg/L,冬季分别为 9.51, 0.92, 7.33 和 54.10 mg/L。2014 年白洋淀鸭养殖区污染呈恶化趋势,相比 2009 年,养殖区水体中 NH₄⁺-N 增长了 10.4 倍, NH₄⁺-N 与 TN 的比值也增长了 1 倍。

b. 养殖废水在淀区南部消减效果明显优于北部;养殖废水各水质参数中只有 TN 和 NO₃⁻-N 的消减效率在不同季节呈显著差异;养殖废水水质参数中, Cu²⁺ 的消减效率最高,夏冬两季的削减效率分别为每 km (15.5 ± 11.0)% 和 (14.8 ± 12.9)%, NO₃⁻-N 的消减效率最低,夏冬两季分别为每 km (8.7 ± 5.8)% 和 (5.0 ± 4.3)% ;养鸭废水水质消减效率与扩散距离呈负相关关系, Cu²⁺ 的消减效率随扩散距离的增加下降最快, NO₃⁻-N 的消减效率随扩散距离的增加下降最慢。

参考文献:

- [1] 王朝华,崔慧敏.白洋淀水质综合评价[J].南水北调与水利科技,1995,16(2):46-51. (WANG Chaohua, CUI Huimin. Comprehensive evaluation of water quality in Baiyangdian Lake [J]. South-to-North Water Transfers and Water Conservancy Science and Technology, 1995, 16 (2):46-51. (in Chinese))
- [2] 杨丽伟,陈诗越.白洋淀水环境质量评价[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):457-462. (Yang Liwei, CHEN Shiyue. Water quality assessment of Baiyangdian Lake [J]. South-to-North Water Transfers and Water Conservancy Science and Technology, 2015, 13 (3):457-462. (in Chinese))
- [3] 崔力拓,徐春霞,李志伟,等.白洋淀水域环境状况调查与分析[J].中国环境管理干部学院学报,2005,15(3):59-61. (CUI Lituo, XU Chunxia, LI Zhiwei, et al. Investigation and analysis of water environment in Baiyangdian [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2005, 15 (3):59-61. (in Chinese))
- [4] 刘小宁,胡正义,朱春游,等.白洋淀湖心岛分散式鸭养殖污染控制技术研究[J].中国农业科技导报,2012,14(3):132-137. (LIU Xiaoning, HU Zhengyi, ZHU Chunyou, et al. Studies on technology for controlling pollutants from decentralized duck breeding at islet of Baiyangdian [J]. Journal of Agricultural Science and

- Technology,2012,14(3):132-137. (in Chinese))
- [5] 刘嘉莉.白洋淀鸭养殖粪便排放规律及源头减排效果研究[D].保定:河北农业大学,2011:12-20.
- [6] XING G, CAO Y, SHI S, et al. N pollution sources and denitrification in waterbodies in Taihu Lake region[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2001, 44(3): 304-314.
- [7] GU P, SHEN R, CHEN Y. Diffusion pollution from livestock and poultry rearing in the Yangtze Delta, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2008, 15(3): 273-277.
- [8] 王惠惠,胡正义,王淑平,等.雨季白洋淀地区散养鸭粪中氮素去向研究[J].中国生态农业学报,2010,18(6):1289-1294. (WANG Huihui, HU Zhengyi, WANG Shuping, et al. Environmental fate of released nitrogen from scattered feeding duck feces during rainy seasons in the Baiyangdian Lake Region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1289-1294. (in Chinese))
- [9] VADAS P. Distribution of phosphorus in manure slurry and its infiltration after application to soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(2): 542-547.
- [10] 张笑归,刘树庆,窦铁岭,等.白洋淀水环境污染防治对策[J].中国生态农业学报,2006,14(2):27-31. (ZHANG Xiaogui, LIU Shuqing, DOU Tieling, et al. Strategies for controlling water environmental pollution in the area of Baiyangdian Lake [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(2): 27-31. (in Chinese))
- [11] 于炎湖.饲料安全性问题(3):畜禽日粮中添加高铜,高锌导致的问题及其解决办法[J].养殖与饲料,2003(1):5-6. (YU Yanhu. Feed safety issues (3): livestock and poultry diets to add high copper, high zinc problems and their solutions [J]. Breeding and Feed, 2003(1): 5-6. (in Chinese))
- [12] WANG H, DONG Y, YANG Y, et al. Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(12): 2435-2442.
- [13] 温春辉.白洋淀地区重金属的检测及分布[D].保定:河北大学,2009.
- [14] 刘毅,木云珍,陈静.养鸭场对环境影响的调查与评价[J].环境科学导刊,2007,26(3):82-83. (LIU Yi, MU Yunzhen, CHEN Jing. Investigation and assessment on environmental impact from duck farm [J]. Environmental Science Survey, 2007, 26(3): 82-83. (in Chinese))
- [15] 吴一平,李少兰,姬便便.信阳畜禽园区主要废弃物无害化处理的实证分析[J].河南农业大学学报,2007,41(2):107-113. (WU Yiping, LI Shaolan, JI Bianbian. Positive analysis of the free-pollution disposal of main wastes in the livestock & poultry park of Xinyang [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2007, 41(2): 107-113. (in Chinese))
- [16] 赵永坤.淡水养殖水质调查及微生物修复养殖有机物污染的研究[D].南昌:南昌大学,2008.
- [17] SOLIMAN A K, EI-HORBEETY A A A, ESSA M A R, et al. Effects of introducing ducks into fish ponds on water quality, natural productivity and fish production together with the economic evaluation of the integrated and non-integrated systems[J]. Aquaculture International, 2000, 8(4): 315-326.
- [18] 苏嫚丽.太湖地区农村典型河道水体污染特征及源解析[D].南京:南京农业大学,2009.
- [19] 何德进,邢友华,姜瑞雪,等.东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J].环境科学与技术,2010(8):45-48. (HE Dejin, XING Youhua, JIANG Ruixue, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in water and eutrophication assessment of Dongping Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2010(8): 45-48. (in Chinese))
- [20] 刘登国,卢士强,林卫青.陈行水库水质模型与自净规律研究[J].水资源保护,2005,21(2):40-45. (LIU Dengguo, LU Shiqiang, LIN Weiqing. Study on water quality model and self-purification of Chenhang Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(2): 40-45. (in Chinese))
- [21] 张世坤,张建军,田依林,等.黄河花园口典型污染物自净降解规律研究[J].人民黄河,2006,28(4):46-47. (ZHANG Shikun, ZHANG Jianjun, TIAN Yilin, et al. Study on self-purification and degradation of typical pollutants in Huayankou of the Yellow River [J]. Yellow River, 2006, 28(4): 46-47. (in Chinese))
- [22] KONG X, YE S. The impact of water temperature on water quality indexes in north of Liaodong Bay [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 80(1): 245-249.
- [23] 马寨璞,赵建华,康现江,等.白洋淀水循环特点及其对生态环境的影响[J].海洋与湖沼,2007,38(5):405-410. (MA Zhaipu, ZHAO Jianhua, KANG Xianjiang, et al. The wind-driven water circulation in Baiyangdian Lake, China and the implication to environmental remediation [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(5): 405-410. (in Chinese))
- [24] 刘超,宁国辉,律琳琳,等.芦苇湿地系统对鸭粪废水中COD的模拟去除及纳污量核算[J].环境科学学报,2012,32(9):2119-2125. (LIU Chao, NING Guohui, LV Linlin, et al. Removal of COD in duck wastewater and capacity estimation in Baiyangdian Lake based on a simulated reed wetland system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2119-2125. (in Chinese))
- [25] 闻岳,周琪.水平潜流人工湿地净化受污染水体研究[D].上海:同济大学,2007.

(收稿日期:2017-04-27 编辑:彭桃英)