

污水处理厂出水的环境质量和农业再利用

胡雪峰, 朱琴, 陈斌, 邓慧红

(上海大学环境科学与工程系, 上海 200072)

摘要: 对上海市正在运作的四家污水处理厂的出水质量进行监测, 研究了污水厂出水的环境质量与农业再利用问题。由于处理后的生活污水和工业污水在性状上仍有很大差异, 在文中分别进行讨论: (1) 生活污水厂出水氮、磷负荷很高, 大肠杆菌指标也严重超标。若直接用于农业灌溉, 应重视营养盐和病菌对环境的污染问题。选用适当的灌溉方式, 可减轻或避免这类污染。生活污水厂出水重金属含量并不高, 用于农业灌溉, 在短期内对土壤和蔬菜的重金属污染风险并不大; 但由于重金属元素易累积等原因, 这类风险还不能完全排除。(2) 处理后的化工污水, 仍有很高的有机污染负荷; Cl^- 约是《农田灌溉水质标准》中最大允许值的 2 倍; Zn 和 Cd 等重金属也明显偏高。在污水厂改进处理工艺、降低各类污染物负荷前, 还不能直接用于农业灌溉, 以免给农业生态环境带来灾难性后果。

关键词: 农业再利用; 污水处理厂; 生活污水; 工业污水

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0267(2002)06-0530-05

Environmental Quality of Treated Wastewater and Its Reuse for Irrigation

HU Xue-feng, ZHU Qin, CHEN Bin, DENG Hui-hong

(Department of Environmental Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to reuse of treated water from wastewater treatment plants, we monitored the quality of outlet waters from 4 wastewater treatment plants in Shanghai. The treated domestic wastewater and industrial wastewater were discussed separately as they differed in the characteristics. The results showed: (1) High contents of N, P and microorganisms were found in the treated domestic wastewater. Therefore, proper patterns of irrigation, such as trickle irrigation, should be selected when it was reused for agriculture to avoid pathogen and nutrient pollution to crops and environment. Because of low heavy metal contents in the treated domestic wastewater, neither soil nor crops have potential of pollutants from heavy metals in a short period. However, risk of heavy metal pollution could not be prevented as heavy metals are easily accumulated in soil. (2) Organic pollutant contents in the treated chemical wastewater was high; Cl^- was as high as two times the recommended limit value in《Water Quality Standards for Agricultural Irrigation》; and Zn and Cd et al were also higher than expected. To prevent from disastrous consequence to the agricultural ecological environments, such secondary wastewater should not be used for irrigation unless it is treated by more advanced processes.

Keywords: agricultural reuse; domestic wastewater; industrial wastewater; wastewater treatment plants

中国是个水资源十分匮乏的国家。据统计, 1995 年中国 666 座城市中, 约有 333 座缺水, 108 座严重缺水, 年缺水量约达 6 亿 $\text{t}^{[1]}$; 而在广大的乡村地区, 约有 7 千万人面临饮用水短缺的问题^[2]。缺水的地区已不限于我国西北干旱地区; 一些雨量丰沛的沿海地区, 由于大规模的水污染, 呈现出水质性缺水现象。水资源短缺将成为中国今后发展的一个制约因素^[3]。

农业是我国的用水大户, 其用水量占全国总用水量的 65%^[1]。若能实现污水的农业再利用, 不仅可极大地缓解我国目前水资源短缺的问题, 而且可减少排

污量。以色列等国家早就大规模地研究和实施城市污水的农业再利用, 并已取得了显著成效^[4,5]。上海市人口稠密, 工业发达, 城市用水量很大。随着环保投入的增加, 城市污水的处理率逐年上升, 据《上海市环境质量状况公报》公布的资料表明, 1999 年上海市工业污水的处理量为 12.2 亿 t, 占工业污水排放总量的 95.7%; 生活污水的处理量为 5.92 亿 t, 占生活污水排放总量的 50.4%。但总的来说, 对城市污水的处理效果和再利用方面的关注和研究还不多。

由于在目前条件下, 国内绝大部分经污水厂处理后的生活污水和工业污水直接排入环境, 因而有必要对各类污水厂的净化效率、出水的环境质量和农业再利用等问题进行深入研究, 以减少次生污水的环境污

收稿日期: 2002-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49831070)

作者简介: 胡雪峰(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤环境、土壤地理等方向的研究。

染,实现污水的资源化利用。

1 材料与方法

上海市目前运作的污水处理厂,按照其所处理的污水类型,可分为三类:一类以处理生活污水为主;另一类分布于工业区,专门处理工业污水;还有一类是处理合污管道的废水,其污水成因复杂,既有生活污水,也有各种类型的工业污水,如目前新建的石洞口污水处理厂。为了便于研究,选择了两家典型的生活污水处理厂(以 A 和 B 表示)和两家工业污水处理厂(以 C 和 D 表示,其中 C 位于化工区,主要处理化工污水;D 主要处理纺织污水)作为研究对象。于 2001 年 6 月—8 月对 A、B、C、D 污水厂进、出水的瞬时样和连续样进行了多次监测,本文仅列出了各次监测的平均值。各项水质指标的分析测定方法见文献[6]。

为了初步评估用生活污水厂出水灌溉,对土壤和蔬菜可能产生的重金属污染风险,特设计田间试验。在远离工业区的上海西郊,选择无重金属污染,肥力较均匀的田块布置试验。受试蔬菜为茄子和黄瓜,分别用 B 厂出水和试验区附近无明显污染的河流水灌溉(后者作为对照)。小区面积为 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$,每个处理设置三个重复小区 a、b、c。2001 年 3 月 6 日开始试验;6 月 26 日—7 月 2 日采集蔬菜样;8 月 13 日采集土样。植物样品 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干、磨细,用 HNO_3 — HClO_4 消解;土壤样品用王水— HClO_4 消解。污染元素 Cu、Zn、Pb、Cd、As、Ni、Cr 用原子吸收仪测定,其中 As 用石墨炉原子吸收法测定;Hg 用冷原子吸收法测定^[6]。

2 结果与讨论

2.1 生活污水厂出水的环境质量和农业再利用

两家生活污水厂进、出水的物理性状和主要污染指标见表 1、表 2 和表 3。生活污水主要由居民日常

洗涤废水和排泄物组成,因而污水厂进水含有很高的 N、P 和有机负荷。经过污水厂处理,污水的 COD_{Cr} 大幅度降低,表明其有机污染物负荷明显减少;但出水中 N、P 的含量依然很高, TN 高于 $20\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 高于 $2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。A、B 两厂出水 P 的含量和形态较相似;但 N 的形态却各有特点: A 厂出水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 的含量很高,其中生物毒性较大的 NO_2^- 含量高于 $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- 含量较低;而 B 厂出水中 NO_3^- 含量很高, NH_4^+ 和 NO_2^- 含量较低。对两厂出水的多次监测,均得出类似结果。 NO_3^- 是有机质经无机化后的最终产物, B 厂出水 NO_3^- 含量较高, NH_4^+ 和 NO_2^- 的含量很低,说明蛋白性污染物的分解较完全; A 厂出水中 NH_4^+ 和 NO_2^- 的含量均很高,说明部分蛋白性污染物尚在分解之中,微生物活动十分剧烈^[7]。A 厂出水的 COD_{Cr} 高于 B 厂出水,也与此结论相符。这其中的原因,除了两污水厂处理工艺上的差异,可能还与出水处置的不同有关——A 厂出水,直接经管道外排; B 厂出水存放于敞口的蓄水池中。贮存过程中 NH_4^+ 的硝化^[8],也是水体中 NH_4^+ 和 NO_2^- 下降, NO_3^- 升高的一个原因。

对生活污水厂出水中高负荷的 N、P 应引起足够重视。由于目前大部分污水厂出水直接排入邻近的河道,因而次生污水对环境的污染问题不容忽视。此类事件在国外已有发生,如印度一家污水处理厂,将处理后含高浓度 NO_3^- 的水排入湖中,致使邻近地区地下水 NO_3^- 含量直线上升,40% 的井水中 NO_3^- —N 含量高于 $11.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过 WHO 规定的饮用水极限值^[9]。

A、B 两厂出水中重金属含量并不高,虽 Cu、Zn、Hg 等指标高于当地河流水,但均未超出《农田灌溉水质标准》规定的阈值。但由于重金属不可降解,却又易在土壤表层累积;污水厂出水中的重金属负荷又有随进水质量和处理设施的运作状况而变化的一面,因

表 1 上海市污水处理厂进、出水物理性状指标

Table 1 Physical features of inlet and outlet waters from the wastewater treatment plants, Shanghai

| 污水厂 | 污水类型 | | pH | 颜色 | 气味 | 浑浊 | 悬浮物 |
|-----|------|----|-----|-----|-------|-----------|----------|
| A | 生活污水 | 进水 | 6.8 | 乳白色 | 有臭味 | 较浑浊 | 较多 |
| | | 出水 | 6.5 | 无色 | 有微臭 | 较清 | 少量纤维状悬浮物 |
| B | 生活污水 | 进水 | 6.5 | 白色 | 有臭味 | 较浑浊 | 较多 |
| | | 出水 | 6.3 | 无色 | 有微臭 | 较清 | 很少 |
| C | 化工污水 | 进水 | 6.8 | 粉红色 | 有刺鼻气味 | 较浑浊 | 较多 |
| | | 出水 | 6.8 | 粉红色 | 有刺鼻气味 | 较浑浊 | 很少 |
| D | 纺织污水 | 进水 | 6.8 | 白色 | 有刺鼻气味 | 有大量泡沫, 浑浊 | 较多 |
| | | 出水 | 6.5 | 无色 | 无味 | 较清 | 很少 |

表2 上海市污水处理厂进、出水主要污染物指标($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 2 Main pollutant contents in inlet and outlet waters from the wastewater treatment plants, Shanghai

| 污水厂 | | TN | NH_4^+ | NO_3^- | NO_2^- | TP | SP | COD_{Cr} | Cl^- | 大肠杆菌 /个 $\cdot \text{L}^{-1}$ |
|-----|----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------|------|--------------------------|---------------|----------------------------------|
| A | 进水 | 49.62 | 33.78 | 0.40 | 0.45 | 4.10 | 3.40 | 259.90 | 70.55 | > 238 000 |
| | 出水 | 20.70 | 13.69 | 0.48 | 1.16 | 2.15 | 1.74 | 62.34 | 70.55 | > 238 000 |
| B | 进水 | 90.00 | 52.30 | 3.41 | 0.22 | 3.31 | 3.27 | 1 441.31 | 93.12 | > 238 000 |
| | 出水 | 24.55 | 0.07 | 24.46 | 0.04 | 2.64 | 2.60 | 37.54 | 92.72 | > 238 000 |
| C | 进水 | 28.86 | 20.56 | 3.10 | 0.77 | 1.74 | 1.61 | 371.19 | 423.28 | 未检测 |
| | 出水 | 35.32 | 27.97 | 3.45 | 1.94 | 1.76 | 1.56 | 186.52 | 497.85 | 未检测 |
| D | 进水 | 13.94 | 10.41 | 2.54 | 0.31 | 0.84 | 0.77 | 134.16 | 393.04 | 未检测 |
| | 出水 | 8.05 | 3.93 | 2.10 | 0.11 | 0.60 | 0.57 | 53.51 | 147.54 | 未检测 |

表3 上海市污水处理厂进、出水重金属污染元素指标

Table 3 Heavy metal contents in the inlet and outlet waters from the wastewater treatment plants, Shanghai

| 污水厂 | | Cu / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | Zn / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | Pb / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | Cd / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ | Ni / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | Cr / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | As / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ | Hg / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |
|-----|-----|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| A | 小河流 | 0.015 | 0.067 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.905 | 0.140 |
| | 进水 | 0.069 | 0.303 | 0.010 | 0.150 | 0.000 | 0.020 | 0.655 | 1.533 |
| | 出水 | 0.041 | 0.247 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.790 | 1.487 |
| B | 进水 | 0.561 | 2.429 | 0.070 | 2.800 | 0.012 | 0.040 | 0.900 | 3.335 |
| | 出水 | 0.043 | 0.140 | 0.010 | 0.700 | 0.000 | 0.005 | 0.345 | 0.448 |
| C | 进水 | 0.142 | 3.113 | 0.055 | 2.300 | 0.017 | 0.020 | 0.655 | 0.833 |
| | 出水 | 0.195 | 1.606 | 0.045 | 2.600 | 0.043 | 0.020 | 0.395 | 0.371 |
| D | 进水 | 0.016 | 0.238 | 0.015 | 3.250 | 0.001 | 0.005 | 0.755 | 1.910 |
| | 出水 | 0.003 | 0.061 | 0.010 | 5.400 | 0.007 | 0.010 | 0.235 | 1.834 |

此, 本文专门布置了农田小区试验, 对次生污水灌溉条件下, 土壤和作物重金属污染风险进行初步评估。B厂出水灌溉一个生长季节(约4个月)后, 试验作物(茄子和黄瓜)干物质各种污染元素(Cu、Zn、Cd、Pb、Ni、Cr、As和Hg)含量与对照的差别未达到显著水平(表4)。灌溉小区表土层(0—20 cm)8个污染元素含量与对照也无显著差异(表5)。但这项试验还远不能排除用生活污水厂出水灌溉所带来的重金属污染风险, 因为农业灌溉是个长期的过程, 灌溉水中任何轻微的重金属负荷, 都易在土壤中得到累积和复加。

污水厂处理后的生活污水, 有机污染物和重金属含量已大幅度降低, 而含量较高的N、P物质又是作物生长的必需元素。若能用于农业灌溉, 既可缓解水资源短缺的矛盾, 又可减少因直排而造成的环境污染风险, 符合持续发展的方向; 但处理后的生活污水中大肠杆菌指标高于《农田灌溉水质标准》最大允许值23倍多, 必须防止病菌对农产品和水源的污染。成都和沈阳张士污灌区曾产生流行病和疾病死亡率增高的现象^[10]。为了确保公共卫生, 有的国家在污水农用前, 一般要用 Cl_2 、臭氧或紫外光消毒。由于污水中的 NH_4^+ 会消耗 Cl_2 , 因而在消毒前一般采用贮

存, 或远距离管道传输的办法, 来降低 NH_4^+ 的含量^[8、11]。但对次生污水进行消毒处理, 势必增加成本。若选择适当的灌溉方式, 也可避免由次生污水灌溉而造成的病菌或其它类型的污染。目前在我国, 大部分农田灌溉采用的还是原始的漫灌方法, 这种灌溉方式耗水量大——漫灌比喷灌多耗水30%, 比滴灌多耗水70%^[12]; 水利用率低——渗漏、蒸发、径流等的损失较大; 污染风险大——营养元素对地下水和地表水的污染, 病菌对农作物的污染等。若采用滴灌, 不仅可提高水的利用率, 而且可把污染降低到最低限度。滴灌可按管道的位置分为土壤表层滴灌和土壤表下层滴灌两种: 土表滴灌——污水由地表渗入, 但不接触植株的茎叶, 阳光照射和地表高温可杀死由污水带到地表的病菌; 表下层滴灌——管道系统位于地表下25—50 cm植物根系最密集部位, 污水中的营养元素会很快被作物吸收; 而土壤表层和作物地上部由于未接触污水, 可避免受病菌污染^[5、12]。但滴灌系统成本过高, 在国内目前条件下还不可能大规模地使用。

国内有用芦苇湿地系统净化污水厂出水, 再用于农业灌溉的例子。湿地生态系统能吸收污水中的营养元素, 分解有机污染物, 截留有害有毒物质, 有很强的净化功能。湿地系统成本低, 又可回收资源, 在发达国

表 4 生活污水厂出水灌溉条件下蔬菜重金属负荷

Table 4 Heavy metal contents in the vegetables of irrigated and control fields

| 蔬菜 | 小区 | Cu | Zn | Pb | Cd | Ni | Cr | As | Hg | |
|---------|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| | | /mg · kg ⁻¹ | /μg · kg ⁻¹ | /μg · kg ⁻¹ | |
| B 厂出水灌溉 | 茄子 | a | 11.16 | 19.62 | 0.68 | 0.12 | 0.48 | 0.83 | 41.52 | 2.31 |
| | | b | 13.00 | 18.37 | 1.07 | 0.12 | 0.50 | 0.76 | 28.77 | 10.66 |
| | | c | 10.02 | 19.06 | 0.97 | 0.14 | 0.64 | 1.57 | 26.16 | 1.53 |
| 对照 | 茄子 | a | 11.22 | 19.84 | 1.31 | 0.08 | 0.82 | 2.26 | 15.47 | 1.51 |
| | | b | 11.37 | 22.30 | 0.88 | 0.13 | 0.54 | 0.78 | 11.71 | 1.99 |
| | | c | 12.13 | 22.33 | 1.27 | 0.22 | 0.70 | 1.37 | 16.10 | 1.47 |
| B 厂出水灌溉 | 黄瓜 | a | 10.97 | 45.29 | 1.84 | 0.17 | 1.02 | 1.75 | 11.26 | 16.18 |
| | | b | 10.86 | 39.71 | 2.15 | 0.36 | 0.78 | 2.09 | 10.01 | 1.70 |
| | | c | 10.24 | 31.66 | 2.22 | 0.18 | 0.77 | 0.87 | 13.52 | 4.20 |
| 对照 | 黄瓜 | a | 11.03 | 46.34 | 2.19 | 0.28 | 0.79 | 0.80 | 10.12 | 2.79 |
| | | b | 9.58 | 36.89 | 2.63 | 0.34 | 1.39 | 1.89 | 12.08 | 5.35 |
| | | c | 10.86 | 22.93 | 1.74 | 0.18 | 0.62 | 0.88 | 12.32 | 4.95 |

表 5 生活污水厂出水灌溉条件下表土层(0—20 cm)重金属负荷

Table 5 Heavy metal contents in top soils of irrigated and control fields

| 蔬菜 | 小区 | Cu | Zn | Pb | Cd | Ni | Cr | As | Hg | |
|---------|----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------|
| | | /mg · kg ⁻¹ | /μg · kg ⁻¹ | /μg · kg ⁻¹ | |
| B 厂出水灌溉 | 茄子 | a | 21.17 | 60.41 | 29.96 | 0.86 | 11.98 | 12.98 | 1 467.9 | 20.4 |
| | | b | 19.34 | 57.47 | 24.77 | 0.78 | 12.38 | 8.92 | 1 439.9 | 88.8 |
| | | c | 20.21 | 64.21 | 23.01 | 0.63 | 11.70 | 7.00 | 1 228.1 | 66.6 |
| 对照 | 茄子 | a | 20.71 | 67.47 | 31.70 | 0.70 | 14.56 | 10.90 | 1 594.0 | 57.0 |
| | | b | 22.56 | 69.69 | 29.95 | 0.54 | 14.68 | 8.99 | 1 375.8 | 51.0 |
| | | c | 21.52 | 64.86 | 29.03 | 0.62 | 12.11 | 8.01 | 1 293.3 | 89.9 |
| B 厂出水灌溉 | 黄瓜 | a | 18.97 | 63.31 | 32.95 | 0.56 | 13.68 | 8.99 | 1 226.7 | 97.2 |
| | | b | 19.94 | 58.04 | 26.79 | 0.85 | 11.61 | 10.91 | 1 451.4 | 32.6 |
| | | c | 20.06 | 59.19 | 26.08 | 0.55 | 13.34 | 7.02 | 1 212.9 | 75.4 |
| 对照 | 黄瓜 | a | 20.71 | 67.47 | 31.70 | 0.70 | 14.56 | 10.90 | 1 161.6 | 43.1 |
| | | b | 18.25 | 61.41 | 27.78 | 0.68 | 14.78 | 8.93 | 1 249.0 | 81.3 |
| | | c | 20.16 | 79.56 | 35.94 | 1.02 | 14.77 | 8.87 | 1 151.4 | 66.5 |

家早有广泛应用^[13]。生活污水处理厂排放的高 P 高 N 的次生污水,若能经湿地系统的净化,再排放或农用,对环境的污染风险就会降至最低。

2.2 工业污水厂出水的环境质量与农业再利用

工业污水在污染物的种类和含量上与生活污水有很大差异,不同类型的工业污水在性状上又有区别。本文以化工污水和纺织污水为例,来探讨其农业再利用的可能性。与生活污水不同,化工污水中的有机污染物较难降解。处理后的化工污水(C 厂出水),COD_{Cr} 值接近 200 mg · L⁻¹,颜色与进水一样仍呈粉红色,且具刺鼻气味,表明仍含有较多的有机污染物。相比之下,处理后的纺织污水有机负荷较低。

化工污水和纺织污水中 N、P、Cl 的含量很高,可能与生产过程中使用了与之相关的化学原料有关。经污水厂处理后,N、P、Cl 含量依然很高。其中 C 厂出水中 Cl⁻ 的含量甚至接近 500 mg · L⁻¹,约是《农田灌溉

水质标准》规定的最大允许值的 2 倍;D 厂出水中 Cl⁻ 的含量也达 147.54 mg · L⁻¹。含高 Cl⁻ 污水灌溉,会降低土壤肥力;影响一些作物(忌氯作物)的品质,如使烟草燃烧性降低,薯类作物淀粉减少。

工业污水处理厂出水重金属含量明显高于生活污水厂出水。处理后的化工污水,Cu、Zn、Pb、Cd、Ni 含量偏高,Zn 和 Cd 尤其突出;处理后的纺织污水,Zn、Cd 含量也略偏高。虽然其各项重金属指标未超出《农田灌溉水质标准》中规定的阈值,但由于重金属易在环境中累积,以及污水厂出水质量上的不稳定等因素,使得上述两种次生工业污水用于农业灌溉后仍具有重金属污染风险。因而,只有在提高工业污水处理水准的条件下,才能考虑其农业再利用问题。

3 结论

经污水厂处理后的生活污水 N、P 含量和大肠杆

菌指标都很高;重金属含量不高,在短期灌溉条件下,对土壤和蔬菜的重金属污染风险并不大。在次生生活污水农用时,为避免其中的营养元素和病菌对土壤、水源和作物的污染,可采用滴灌的方式。次生污水经湿地生态系统净化后,再用于农业灌溉,也不失为一种好方法。

上海某化工区化工污水处理厂的出水,依然有很高的有机污染负荷;Cl⁻约是《农田灌溉水质标准》中最大允许值的 2 倍;Zn 和 Cd 等重金属元素含量也明显偏高。在污水厂改进处理工艺,降低各类污染物负荷前,还不能直接用于农业灌溉,以免给农业生态环境带来灾难性后果。

参考文献:

- [1] 黄仲杰. 我国城市供水现状、问题与对策[J]. 给水排水, 1998, **24**(2): 18 - 20.
- [2] 杨淑英, 张增强. 我国水资源面临的问题与对策[J]. 环境保护, 1997, (11): 6 - 8, 15.
- [3] He P J, Phan L, Gu G W and Hervouet G. Reclaimed municipal wastewater - a potential water resource in China[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, **43**(10): 51 - 58.

- [4] Oron G, Armon R, Mandelbaum R, et al. Secondary wastewater disposal for crop irrigation with minimal risks[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, **43**(10): 139 - 146.
- [5] Oron G, Demalach Y, Hoffman Z, et al. Wastewater disposal by sub-surface trickle irrigation[J]. *Wat Sci Tech*, 1991, **23**(10 - 11), 2 149 - 2 158.
- [6] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 78 - 196.
- [7] 汪晋山, 黄新华, 程国佩. 水化学与水污染[M]. 广州: 中山大学出版社, 1989. 67 - 69.
- [8] Delgado S, Elmaleh S, Dfaz F, et al. Ammonia removal in a deep reclaimed wastewater reservoir before agricultural reuse[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, **43**(10): 125 - 132.
- [9] Mathur Y P and Kumar P. Concerns and trends in environmental levels of nitrates[J]. *Ind J Environ Health*, 1990, **32**: 97 - 108.
- [10] 李芳柏, 古国榜, 肖锦, 等. 城市污水处理与农业回用辨析[J]. 农业环境保护, 1998, **17**(5): 237 - 239.
- [11] Delgado S, Alvarez M, Rodriguez - Gomez L E, et al. How partial nitrification could improve reclaimed wastewater transport in long pipes[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, **43**(10): 133 - 138.
- [12] Oron G, Demalach Y, Hoffman Z and Manor Y. Effluent reuse by trickle irrigation[J]. *Wat Sci and Tech*, 1991, **24**(9): 103 - 108.
- [13] White J S and Bayley S E. Nutrient retention in a northern prairie marsh (Frank Lake, Alberta) receiving municipal and agro - industrial wastewater[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, **126**: 63 - 81.

中国自然科学学术期刊显示度排名表——《农业环境保护》列入环境科学类前 10 名

| 综合类 | | 数学类 | | 地学类 | | 生物类 | | 技术科学类 | |
|-------------------|----|-----------------------|----|----------|----|---------------|----|----------|----|
| 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 |
| 中国科学 | 1 | Acta Math Sin New Ser | 1 | 地球物理学报 | 1 | 植物学报 | 1 | 金属学报 | 1 |
| 科学通报 | 2 | 数学年报 | 2 | 第四纪研究 | 2 | 遗传学报 | 2 | 分析试验室 | 2 |
| 自然科学进展 | 3 | 计算数学 | 3 | 地质学报 | 3 | 生物多样性 | 3 | 摩擦学报 | 3 |
| 控制与决策 | 4 | Chin Ann Math B | 4 | 地理学报 | 4 | 植物生态学报 | 4 | 无机材料学报 | 4 |
| 中山大学学报 | 5 | J Comput Math | 5 | 矿床地质 | 5 | 植物生理学报 | 5 | 电力系统自动化 | 5 |
| 武汉大学学报 | 6 | 应用数学学报 | 6 | 岩石学报 | 6 | 中国生物化学与分子生物学报 | 6 | 计算机学报 | 6 |
| 北京大学学报 | 7 | 数学年刊·A | 7 | 地质论评 | 7 | 生物化学与生物物理学报 | 7 | 电子学报 | 7 |
| 北京师范大学学报 | 8 | 系统科学与数学 | 8 | 地学前缘 | 8 | 生物化学与生物物理进展 | 8 | 中国稀土学报 | 8 |
| 南京大学学报 | 9 | 系统工程学报 | 9 | 地球化学 | 9 | 生物工程学报 | 9 | 软件学报 | 9 |
| 清华大学学报 | 10 | 数学进展 | 10 | 气象学报 | 10 | 实验生物学报 | 10 | 中国有色金属学报 | 10 |
| 物理类 | | 化学类 | | 农林科学类 | | 医药卫生类 | | 环境科学类 | |
| 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 | 期刊名称 | 位次 |
| Chin Phys Lett | 1 | 高等学校化学学报 | 1 | 中国农业科学 | 1 | 中国药理学报 | 1 | 生态学报 | 1 |
| 物理学报 | 2 | 分析化学 | 2 | 作物学报 | 2 | 药学报 | 2 | 环境科学进展 | 2 |
| 力学学报 | 3 | 化学进展 | 3 | 林业科学 | 3 | 中华医学杂志 | 3 | 应用生态学报 | 3 |
| 光谱学与光谱分析 | 4 | 化学学报 | 4 | 土壤学报 | 4 | 病毒学报 | 4 | 环境科学 | 4 |
| Commun Theor Phys | 5 | 催化学报 | 5 | 植物病理学报 | 5 | 中华微生物学和免疫学杂志 | 5 | 生态学杂志 | 5 |
| 物理学进展 | 6 | 高分子学报 | 6 | 园艺学报 | 6 | 中华检验医学杂志 | 6 | 中国环境科学 | 6 |
| 光学学报 | 7 | 化学通报 | 7 | 中国水稻科学 | 7 | 中华心血管病杂志 | 7 | 环境科学学报 | 7 |
| 力学学报 | 8 | 物理化学学报 | 8 | 水产学报 | 8 | 中华结核和呼吸杂志 | 8 | 环境化学 | 8 |
| 岩石力学与工程学报 | 9 | 无机化学学报 | 9 | 北京林业大学学报 | 9 | 中华肿瘤杂志 | 9 | 自然灾害学报 | 9 |
| 高能物理与核物理 | 10 | 色谱 | 10 | 植物保护学报 | 10 | 中草药 | 10 | 农业环境保护 | 10 |

注: 中国科学院自然科学期刊编辑研究会自然科学学术期刊评价指标体系研究课题组运用“自然科学学术期刊评价指标体系”中的 11 个文献计量指标, 根据中国科学引文数据库 1999 年数据, 经加权统计和综合计算后, 得到我国自然科学学术期刊按学科分类的显示度排序。

(摘自 <http://www.ifc.dicp.ac.cn>)