

工业厂房屋面雨水储存过程中水质变化的实验研究

孟 军, 崔佳鑫

长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年2月19日; 录用日期: 2023年4月3日; 发布日期: 2023年4月28日

摘 要

通过对苏南某工业园区蓄水池贮存的屋面雨水进行为期一年的水质监测, 分析水质变化规律, 为工业园区雨水资源化利用方案提供基础数据支持。实验结果显示: 蓄水池内水样各项生物化学指标浓度在秋季最高, 春季、夏季次之, 在冬季浓度最低。由于SS共沉降和微生物活动, 随着蓄水时间延长, 池内水质理化指标(总氮除外)均有所降低, 总大肠菌群浓度总体呈升高趋势, 但幅度不大。总大肠菌群和浊度指标一年四季均达不到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920-2020)的要求, 若调蓄池内雨水用于冲厕、道路清扫、消防、城市绿化、车辆冲洗、建筑施工, 还需要过滤、消毒等措施。

关键词

雨水收集, 雨水利用, 水质评价, 工业园区

Experimental Study on Water Quality Change during the Storage of the Rainwater of the Industrial Plant's Roof

Jun Meng, Jiaxin Cui

Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan Hubei

Received: Feb. 19th, 2023; accepted: Apr. 3rd, 2023; published: Apr. 28th, 2023

Abstract

Through monitoring the roof rainwater stored in an industrial park in southern Jiangsu for one year, this paper analyzed the water quality changes, and provided basic data support for the rainwater resource utilization. The results show that the concentration of various biochemical indicators of the water sam-

作者简介: 孟军, 辽宁锦州人, 1990年5月出生, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水环境综合整治、污水系统提质增效。
Email: mengjun@cjwsjy.com.cn

ples in the reservoir is the highest in autumn, the second in spring and summer, and the lowest in winter. Due to SS co-sedimentation and microbial activity, the physical and chemical indexes of the water quality (except for total nitrogen) decreased by time, and the overall concentration of the total coliform group small increased. The total coliform group and turbidity do not meet the requirements of *The Reuse of Urban Recycling Water-Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use (GB/T 18920-2002)* all the year round. If the rainwater in the storage tank is used for flushing, road cleaning, fire fighting, urban greening, vehicle washing and construction, filtration and disinfection measures are also needed.

Keywords

Rainwater Collection, Rainwater Utilization, Water Quality Evaluation, Industrial Park

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2014年10月,住建部下发《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》,指南提出:“充分利用多功能调蓄设施调控排放径流雨水”,“明确低影响开发径流总量控制目标与指标”,“明确雨水资源化利用目标及方式”,“与城市雨水管渠系统及超标雨水径流排放系统有效衔接”[1],工业园区作为苏南十分密集的一种小区形式,占据城市面积比较大,采取一些雨水收集利用措施,会有力地促进海绵城市、生态城市的建设,解决市政管道排水能力不足的问题,降低管道压力。

雨水资源在水资源短缺或污染地区显现出十分巨大的经济性[2],它的一个主要优势是供水地靠近用水地,减少了运行维护的问题和费用,并且相比于其他水源,雨水利用对环境没有冲击[3]。国外的研究显示,经过初期弃流的雨水资源相比地表水水质更好[4],傅大放、张科峰等人的研究表明:屋面径流和路面径流初期效应显著,弃去前30%的径流可削减70%以上的污染物[5][6]。相比于路面径流,屋面由于其本身相对干净整洁,利用屋面雨水成本低、效果好。屋面雨水径流的水质和出流规律等课题国内外已有很多研究,积累了大量的基础数据,通过这些研究我们也明确了屋面雨水的可利用性,但是针对雨水利用安全性有着重要影响的一个重要技术环节——雨水储存过程水质的变化与安全的研究还并不多。国内外针对雨水储存的工作主要集中于饮用水用途的雨水水质研究,并且检测储存时间也较短,对于用于杂用景观雨水长时间内的水质变化研究还存在欠缺。本研究通过选择最不利场地(工业园区)在极端情况下(1个月)雨水储存的水质变化,目的在于:1)评估工业园区内收集雨水的水质情况,确定是否适合杂用;2)调查雨水径流可能对水环境造成的污染。

2. 研究材料及方法

2.1. 研究区域概述

本研究选取苏南某市环科园群建公司内一工厂房钢板屋面作为收集区域,如图1所示,钢筋混凝土蓄水池埋设在厂房附近,覆土厚度0.5 m。研究区域位于北亚热带与中亚热带过渡地,四季分明。年平均气温15.7℃,最高气温39.6℃,降水丰沛,全年有雨,年平均雨日136.6天,年平均降水量1177毫米,春夏雨水集中;6月中旬至7月初为梅雨季节,地面水、地下水丰富。群建公司工业园区位于宜兴市区西南部国家环科园岳东路北侧,毗邻104国道,周边企业众多,包括电子、钢构、环保等多种行业,工业集聚度较高,屋面材质为彩钢板,为国内工业厂房最常见屋面形式。

本研究屋面径流经落水管汇集，选择该厂房雨水立管作为取样口，通过降雨时，人工进行雨水取样。所取样品为落水管出流雨水。取样区域特征如表 1。

Table 1. Characteristics of the sampling area

表 1. 取样区域特征

下垫面特征	汇水面积	屋面材料
工业厂房屋面	200 m ²	彩钢板

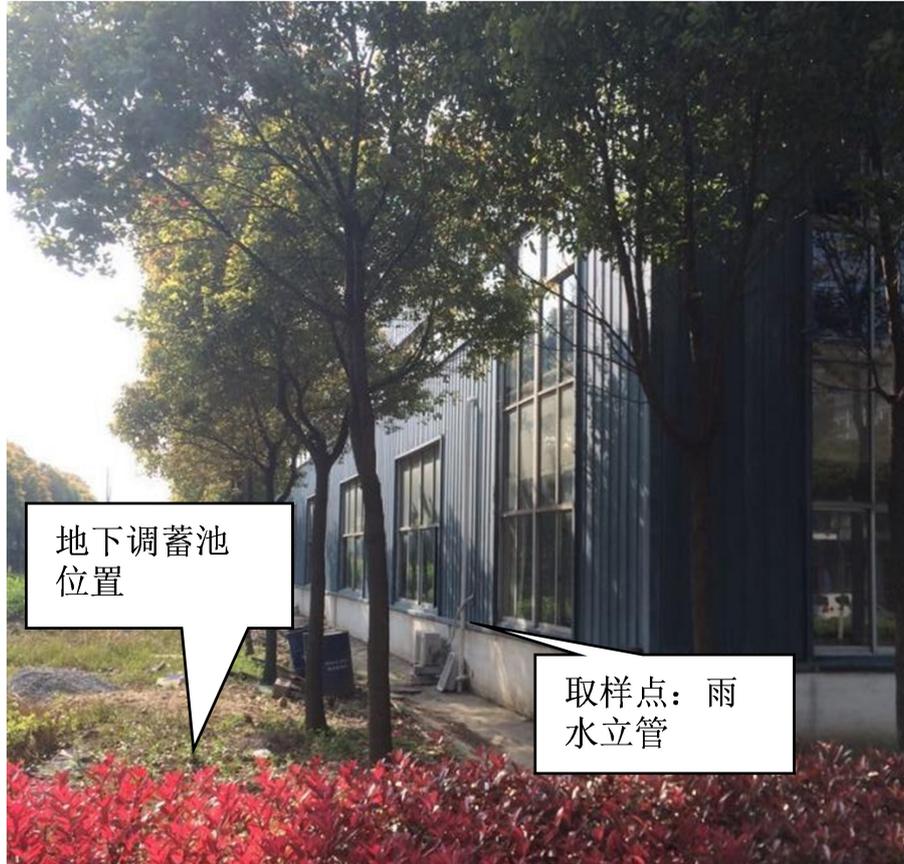


Figure 1. Research site

图 1. 研究位置示意图

2.2. 样品采样与保存

选取春夏秋冬四季各一场降雨(2014 年 4 月、7 月、9 月、2015 年 1 月)，对整场降雨事件采用人工取样。取样方法为：降雨开始后，观察建筑立管取样口处径流，前 30 min 初期径流不取样，在径流形成 30 min 后，用水盆放置在立管下面采集径流，每隔 10~15 min 取样 1 次；此后每隔 30~60 min 取样 1 次，直至降雨事件结束，取样间隔时间可视降雨历时和径流流量改变，每次取样均为 10 L；采集满后将收集的径流通过混凝土蓄水池上部预留进水孔缓慢倒入地下混凝土蓄水池中。

降雨结束后即通过蠕动泵吸取地下混凝土蓄水池内的雨水于 1 L 聚乙烯瓶和 1 L 棕色玻璃瓶中，之后每隔 3 天取一个聚乙烯瓶样，取 10 个，每隔 5 天取一个棕色玻璃瓶样，取 6 个(如图 2)，采样周期为 27 天。采样瓶在使用前经过 10% HCL 溶液浸泡 24 h 并用蒸馏水冲洗干净。



Figure 2. Sample collection
图 2. 样品采集

2.3. 样品分析

样品采集后立即送至实验室在 4℃ 条件下保存并在 24 h 以内进行水质分析, 分析的指标包括温度、pH、SS、COD、BOD₅、NH₃-N、TN、总大肠菌群。分析方法见表 2。

Table 2. Analysis items and test methods
表 2. 分析项目及检测方法

指标	分析方法
PH	玻璃电极法 GB6920-86
悬浮物(SS)	重量法 GB11901-89
五日生化需氧量(BOD ₅)	稀释与接种法 GB/T7488
总大肠杆菌群数	纸片快速法
氨氮(NH ₃ -N)	纳氏试剂比色法 HJ537-2009
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解分光光度法 GB11894-1989
化学需氧量(COD)	回流滴定法 GB11914-89

3. 研究结果

3.1. 理化指标

图 3 和图 4 反映了不同季节水样温度和 pH 值的变化。实验期间温度在 21℃~26℃ 之间, 变化幅度不超过 2℃, 春夏秋季的温度相近, 夏季略高, 在 25℃ 左右; 冬季温度最低, 在 22.5℃ 左右。蓄水池在地面 0.5 m 以下, 与外界的热交换较少, 季节性温差变化不大。夏秋冬季 pH 值的范围在 6.2~7.5 之间, 春季 pH 值较高, 在 8.0~8.5 之间, 春季 pH 值高的原因在于新砌混凝土水池水解, 离子渗出使 pH 值升高。pH 值范围满足《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) [8] 和《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T18920-2020) [9] 的要求。

图 5 揭示了不同季节 SS 的时间变化规律。SS 变化趋势为先升高后降低, 约在第九天浓度达到最高, 在秋季最高超过 200 mg/L, 随后逐渐下降, 到 30 mg/L 左右。原因在于取样口位于水池中部偏下, SS 沉降到附近。

对比不同季节 SS 的沉降状况，初期秋季浓度最高，春夏季次之，冬季最低，后期夏季浓度最高，春秋季次之，冬季最低。冬季径流浊度比较低，悬浮颗粒物少，夏季样品后期浓度高的原因在于夏季 SS 沉降性能不好，多次取样水质仍较浑浊。由于本实验未检测浊度，根据翟世奎等人的研究成果，依据公式(1)通过 SS 估算浊度值[7]，采样末期浊度大于 25NTU，超过《城市污水再生利用 城市杂用水水质》最低要求绿化水的限值 20NTU。

$$\log(SS) = 0.918\log(T) + 0.33 \quad (1)$$

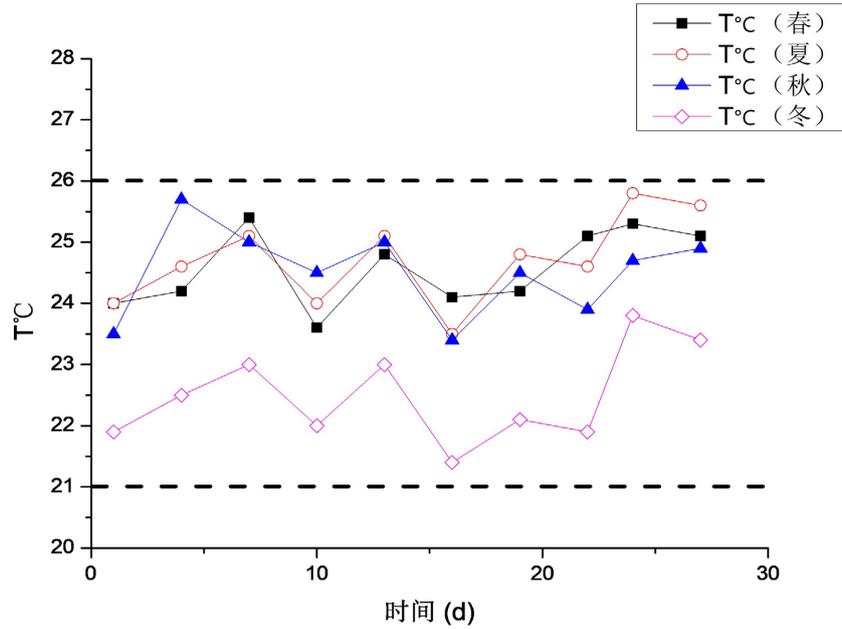


Figure 3. Time variation law of temperature in different seasons
图 3. 不同季节温度的时间变化规律示意图

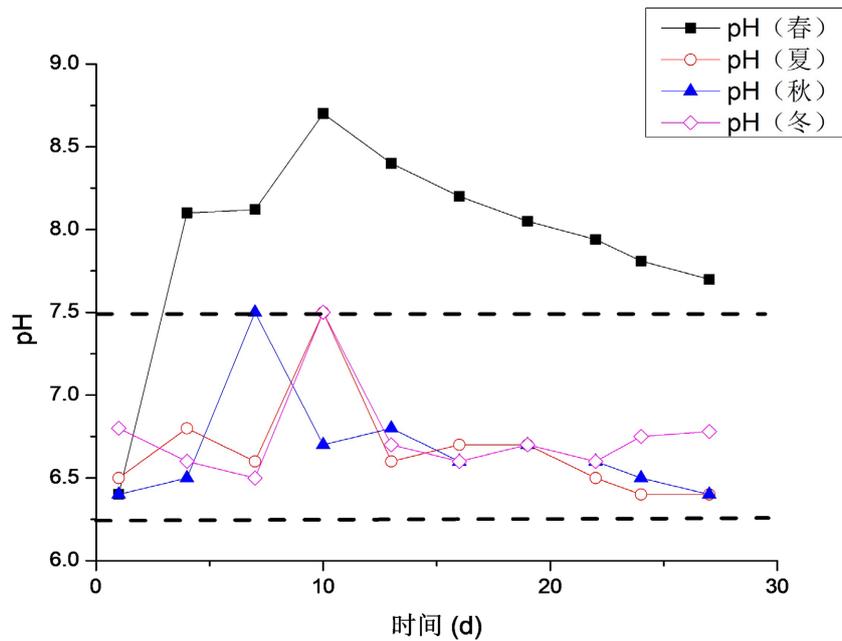


Figure 4. Time variation law of pH in different seasons
图 4. 不同季节 pH 的时间变化规律示意图

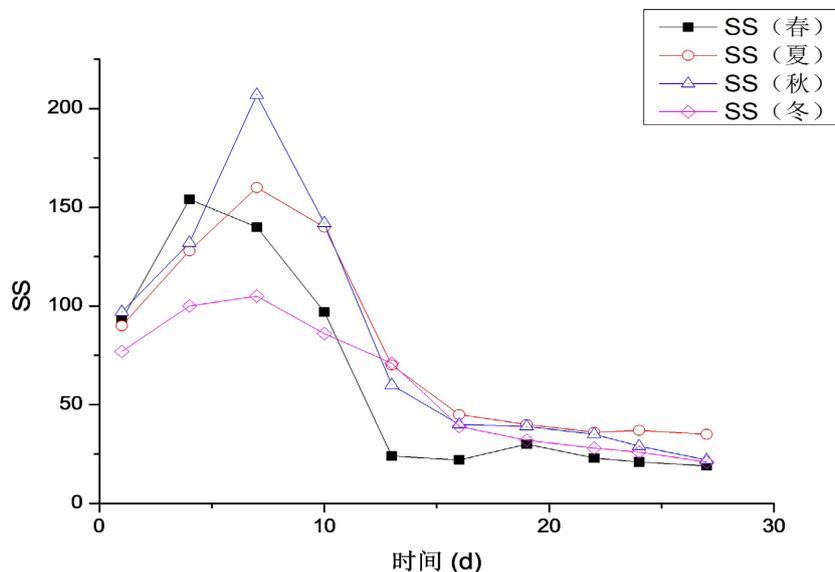


Figure 5. Time variation law of SS in different seasons
图 5. 不同季节 SS 的时间变化规律示意图

3.2. 微生物学指标

图 6 反映了不同季节总大肠菌群的时间变化规律。总大肠菌群的浓度的季节性差异表现为：春夏秋季较高，远远超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) V 类水的限值；冬季浓度低，符合在《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水标准；全年的总大肠菌群数量都远远超出《城市污水再生利用 城市杂用水水质》的要求。总大肠菌群的变化趋势为夏秋季波动上升，春季、冬季波动不变。计算总大肠菌群与电导率的斯皮尔曼相关系数为 0.674，微生物指标的变化与电导率成负相关，电导率高，水中的导电离子浓度高，抑制大肠杆菌的生长；E. Sazakli 的研究发现，Cl⁻对大肠菌群有较为明显的抑制作用，可以解释本研究的结论[3]。大肠杆菌变化趋势不大的原因在于 SS 对大肠菌群有一定的吸附作用，微生物的繁殖与大肠菌群随着 SS 的共沉降达到一定的平衡，使样品的总大肠菌群数的变化相比其他指标要小。

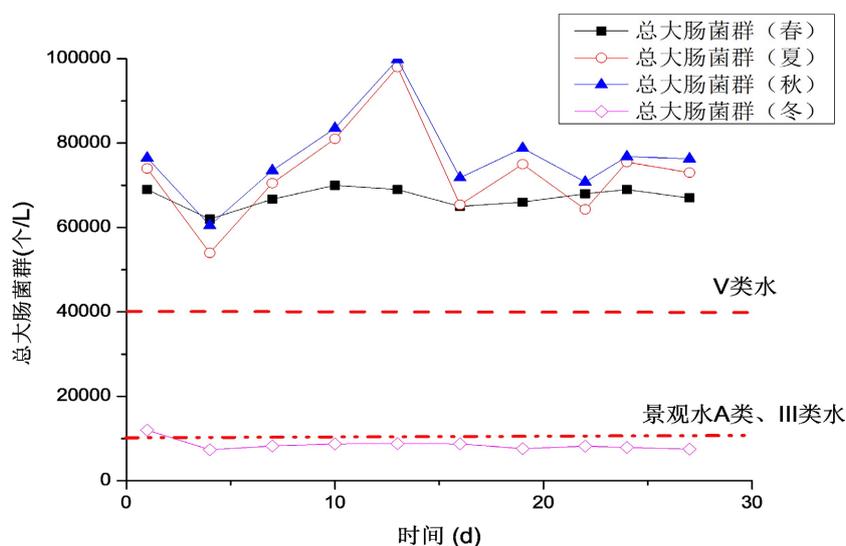


Figure 6. Time variation law of total coliform bacteria in different seasons
图 6. 不同季节总大肠菌群的时间变化规律示意图

3.3. 有机污染物

各项生物化学指标四季变化规律为：秋季各指标浓度最高，春季夏季次之，冬季最低。夏季、秋季在取样末期有蚊虫孳生。

图7反映了不同季节COD的时间变化规律。COD的浓度的季节性差异为：秋季最高，前期超过《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) V类水的限值；春夏浓度略低，没有超出V类水的限值，但是超过了III类水的

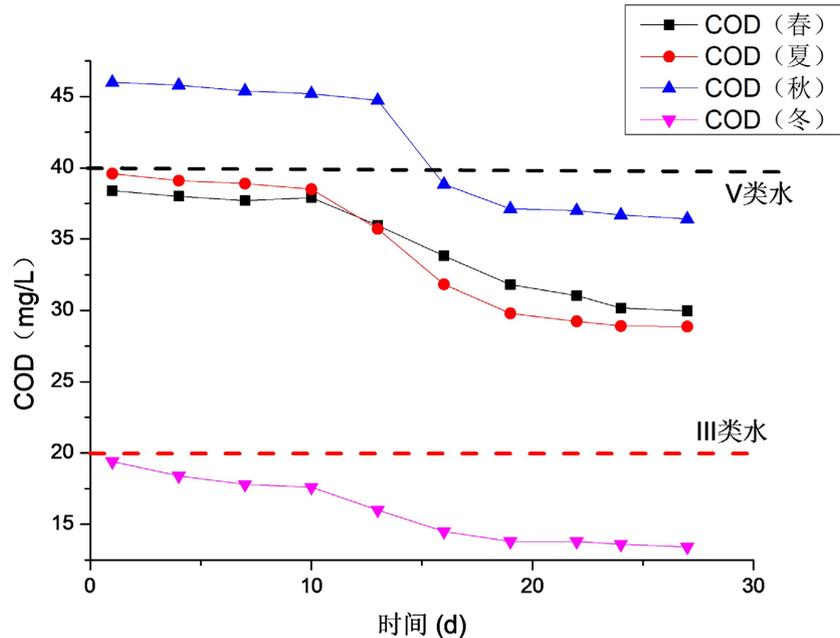


Figure 7. Time variation law of COD in different seasons

图7. 不同季节COD的时间变化规律

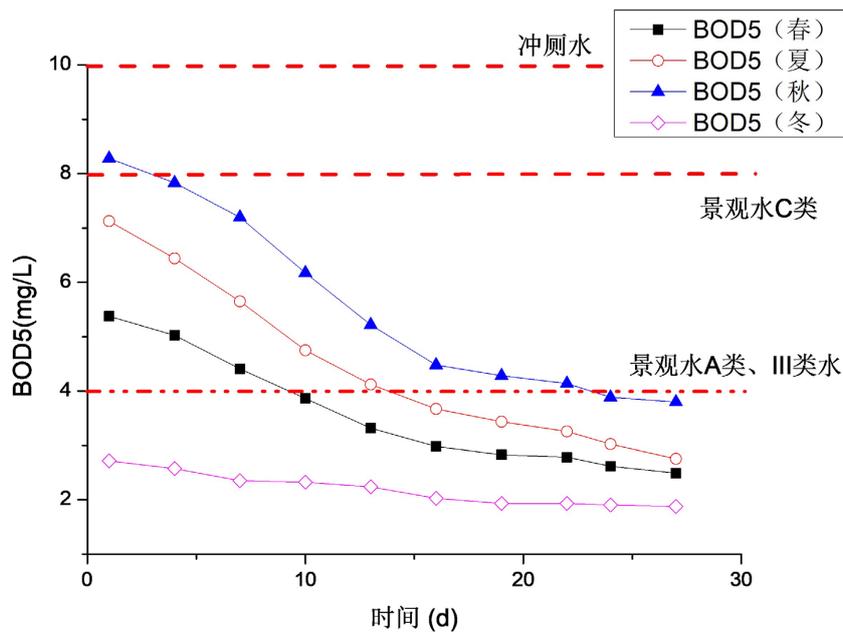


Figure 8. Time variation law of BOD₅ in different seasons

图8. 不同季节BOD₅的时间变化规律

限值；冬季水质最好，没有超出 III 类水的限值。COD 变化趋势：在春夏秋季，变化为先缓慢下降、而后迅速下降，最后趋于平缓。冬季表现为平缓下降。COD 下降的原因，一部分在于少数颗粒态 COD 随 SS 共沉降，另一部分可降解的 COD 被水中微生物降解。

图 8 揭示了不同季节 BOD₅ 的时间变化规律。BOD₅ 的变化趋势：前期迅速下降，后期趋于平缓。BOD₅ 的前期浓度较高，采样后期都达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水的标准；BOD₅ 的最终削减率在夏秋季达到 50%，在春冬季超过 30%。比较不同季节 BOD₅ 浓度：秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季。秋季浓度高的原因可能在于枯枝落叶和秸秆焚烧等原因。除了秋季蓄水池初始样品外，其他样品均满足《城市污水再生利

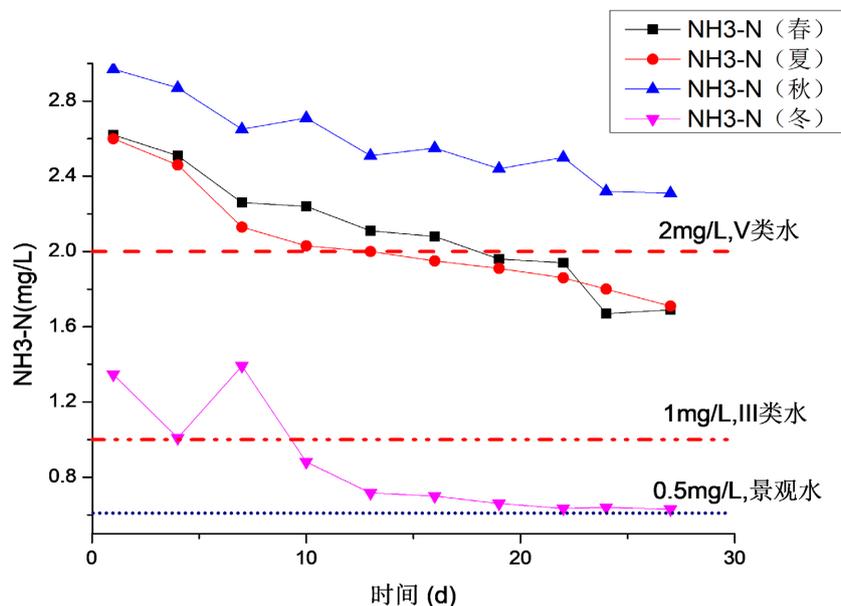


Figure 9. Time variation law of NH₃-N in different seasons

图 9. 不同季节 NH₃-N 的时间变化规律示意图

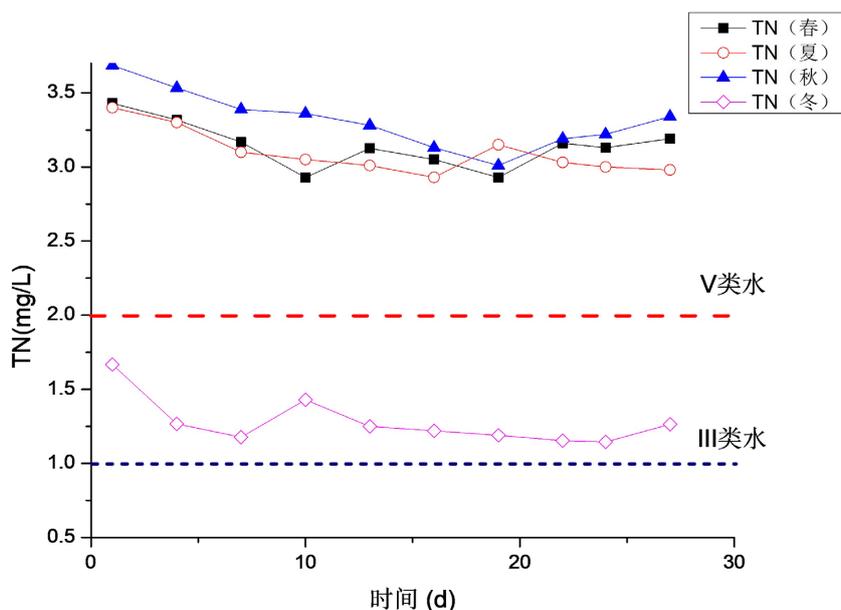


Figure 10. Time variation law of TN in different seasons

图 10. 不同季节雨水中含总氮(TN)随时间的变化规律示意图

用《城市杂用水水质》(GB/T 18920-2020)的要求。

3.4. 氮类污染物

图9揭示了不同季节 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的时间变化规律。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化趋势为:春夏秋三个季度呈波浪锯齿状下降,冬季呈波浪状迅速下降,而后趋于平缓;秋季的水样始终超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)V类水标准,春季、夏季的初期样品超出V类水标准,21天后达到V类水标准,但仍超出III类水标准。冬季初期样品超出III类水标准,12天后达到标准。

图10揭示了不同季节TN的时间变化规律。TN浓度波动变化,原因在于极少部分颗粒态TN随SS共沉降去除,以及测量误差的影响,总体来说,TN的变化不大。

采样末期,水中溶解氧充足,水质未发臭,色度变化不大,但已有蚊虫孳生,故储存期限最好不要超过27天。

4. 结论

本研究通过对收集工业厂房彩钢板屋面径流蓄水池在2014年4月、7月、9月、2015年1月,共4次,每次27天的现场取样监测分析表明:

蓄水池内水样各项生物化学指标浓度在秋季最高,春季、夏季次之,在冬季浓度最低。

由于SS共沉降和微生物活动,随着蓄水时间延长,池内水质理化指标(总氮除外)均有所降低,总大肠菌群浓度总体呈升高趋势,但幅度不大。

总大肠菌群和浊度指标一年四季均达不到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)的要求,若用于冲厕、道路清扫、消防、城市绿化、车辆冲洗、建筑施工,还需要过滤、消毒等措施。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行) [Z]. The Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical guidelines for sponge city construction—Construction of stormwater system for low-impact development (Trial). (in Chinese)
- [2] ZHU, K., ZHANG, L., HART, W., et al. Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid loess plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 487-505. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00118-6)
- [3] SAZAKLI, E., ALEXOPOULOS, A. and LEOTSINIDIS, M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, 2007, 41(9): 2039-2047. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.037>
- [4] UNEP (United Nations Environment Programme). Rainwater harvesting and utilisation. Newsletter and Technical Publications, 2002. <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Urban/UrbanEnv-2/index.aspS>
- [5] 张科峰, 李贺, 傅大放, 等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 724-730.
ZHANG Kefeng, LI He, FU Dafang, et al. Characteristics of heavy metal pollution in runoff from three different types of roofs. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4): 724-730. (in Chinese)
- [6] 傅大放, 石峻青, 李贺. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1672-1677.
FU Dafang, SHI Junqing and LI He. First flush analysis of heavy metals in express ways stormwater runoff. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1672-1677. (in Chinese)
- [7] 翟世奎, 张怀静, 范德江, 等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(5): 693-699.
ZHAI Shikui, ZHANG Huaijing, FAN Dejiang, et al. Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang estuary and adjacent sea area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(5): 693-699. (in Chinese)
- [8] GB3838 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2002.
GB3838 Environmental quality standards for surface water. Beijing: China Environment Publishing Group, 2002. (in Chinese)
- [9] GB/T18920 城市污水再生利用城市杂用水水质[S]. 北京: 中国质检出版社, 2020
GB/T18920 The reuse of urban recycling water-water quality standard for urban miscellaneous use. Beijing: China Quality Inspection Press, 2020. (in Chinese)