

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.019

濉河宿州段河水水化学特征及重金属污染状况分析

杨玉刚¹, 闵 宁²

(宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000)

摘要:为探究濉河宿州段河水水化学特征及重金属污染情况,以濉河宿州符离至顺河段流域为研究对象,利用 Piper 三线图,统计学分析以及离子相关性分析对地表水主要离子化学组成及物质来源进行分析。通过单因子指数法基于《地表水环境质量标准》《生活饮用水卫生标准》及《国家农业灌溉水标准》对濉河宿州段重金属污染特征进行调查分析。结果表明:(1)濉河宿州段地表水 pH 值为 8.1~8.5,平均值为 8.2;TDS 值为 237~324 mg/L,平均值为 264 mg/L;地表水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 型。(2)濉河宿州段地表水阳离子主要以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主,二者质量分数占阳离子总量的 75.1%;阴离子主要以 HCO_3^- 为主,其质量分数占阴离子总量的 56.1%。(3)对水体重金属质量浓度的检测发现,濉河符离到顺河段 As 污染指数较高,已经达到轻度污染。

关键词:濉河;水化学特征;重金属污染

中图分类号:P342;X522 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2021)03-0092-06

Analyses on Water Chemical Traits and Heavy Metal Pollution of Suihe River in Suzhou

YANG Yugang¹, MIN Ning²

(School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000, China)

Abstract: To explore the water chemical traits and heavy metal pollution of Suihe River in Suzhou, the watershed of Suihe River in Suzhou from Fuli to Shunhe was used as the research object. The Piper three-line diagram, the statistical analysis and the ion correlation analysis were used to analyze the surface water's major chemical ions and their sources. In this paper, the single factor index method was adopted to analyze the heavy metal pollution of Suihe River segment in Suzhou based on *Surface Water Environmental Quality Standard*, *Drinking Water Health Standards* and *National Agricultural Irrigation Water Standards*. The results showed that the pH values of the surface water in the Suzhou segment of Suihe River range from 8.1 to 8.5, with an average of 8.2; the TDS values range from 237 to 324 mg/L, with an average of 264 mg/L; the surface water's chemical type is $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$. Our study found that the surface water's cations in the Suzhou section of Suihe River are mainly Na^+ and Ca^{2+} , which account for 75.1% of the total cations; the anions are mainly HCO_3^- , whose content accounts for about 56.1% of the total anions. Through detection of the concentration of heavy metals in the water, we found that the As pollution index is high in the river section from Fuli to Shunhe, which has reached low-grade pollution.

Keywords: Suihe River; water chemical trait; heavy metal pollution

0 引言

地表水与人类生产和生活息息相关。在天然状态下,一些常规离子在地表水体中含量相对稳定,其来源与形成主要与岩石风化有关,比如在一些碳酸盐风化较为常见的地区, HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} 离

子含量比例较高;而在一些受蒸发-结晶影响较大的地区,地表水的 TDS 值通常较小。本文以濉河符离至顺河段为研究对象进行地表水化学方面研究,该研究区域位于安徽省宿州市符离镇境内,研究区内人口数量为 12 万^[1]。宿州位于安徽省北部,人口数量 658.27 万。随着社会的进步,工业和经济的发

收稿日期:2021-05-12

课题来源:宿州学院校级重点项目(2020yzd09)。

作者简介:杨玉刚(1999—),男,安徽合肥人,本科生,研究方向:水化学。

展,水质环境遭受重大破坏,水体污染也越来越严重。水体污染大致可分为物理污染(热污染、放射性污染等),生物污染(病原体污染、霉菌污染等)和化学污染(重金属污染、酚类化合物污染等)^[2]。如今,淮河宿州部分流域的地表水受到沿岸居民生产生活以及大量淤泥和浮萍的影响,水质每况愈下。经实际走访调查,初步认定,研究区可能造成的水体污染来源于养殖场废水排放、居民生活垃圾的影响等。

为了缓解水质恶化,研究人员开发出了几类不同的方法评价分析水质。目前,国内较常用的水质评价方法有综合水质标识指数法、内梅罗污染指数法、模糊理论综合评价法等^[3]。单因子指数法优点在于可以突出污染指数最大的重金属污染物对环境质量的影响和作用^[4],它是较为方便和快捷的一种环境质量评价方法,能单独评价各污染因子,从而揭示水质状况与评价标准之间的关系,但是其评价过于片面,无法进行综合全面的评价。近年来,有研究人员结合环境质量评价和多元统计分析,研究水体污染源,这种方法能够更为全面、准确地评价水体质量^[5]。虽然前人对地表水的水质评价已经做了大量工作,但是对于淮河宿州符离至顺河段的地表水水化学特征以及水体重金属污染评价并未做出详细地研究。基于此,本文利用统计学分析、Pearson 相关性分析法、Piper 图以及 Gibbs 图等方法分析淮河宿州段地表水化学特征;利用单因子指数法和 Pearson 相关性图分析重金属元素含量的分布特征和重金属离子的相关性,识别研究区域的污染情况,对污染区域进行风险评价,为居民的饮水安全提供科学保障。

1 研究区概况

宿州市属暖温带半湿润季风气候区,降水多集中在夏季,春季较为干旱。最大年降雨量 1 363.7 mm,最小年降雨量 564.5 mm,6—9 月降水占全年降水量的 65%~70%^[6]。以目前研究状况,含水层主要可分为 4 类,分别为松散岩类孔隙含水层、碎屑岩类孔隙含水层、碳酸盐岩类含水层以及岩浆岩类裂隙含水层^[7]。研究区含水层主要为松散岩类孔隙水,第 4 系松散含水层覆盖整个研究区。区内土壤多被第 4 系沉积物覆盖,以砂礓黑土为主^[8]。

2 水样采集与样品处理

课题组于 2020 年 10 月对其流域进行了调查,

并沿河流对地表水进行了采样,采样点(1#~7#)分布如图 1 所示。地表水样为淮河宿州符离至顺河段河流水。同一天,对淮河宿州流域进行布点采集,采集水样时,将采样器置于水下 10~20 cm 处,所得水样经过 0.45 μm 滤膜后,立即转入聚乙烯采样瓶中密封冷藏保存,pH 值和 TDS 值分别采用 pH 计和 TDS 计在原位条件下直接检测,采样结束一周内室内分析其离子质量分数。

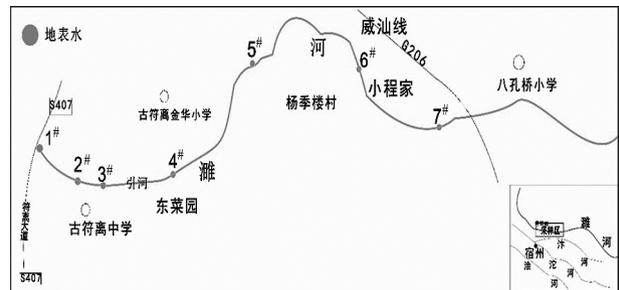


图 1 淮河宿州符离至顺河流域采样点位置分布

采样结束后,在现场调查基础上,分析所采取的水样,水样的离子成分组成在安徽省煤矿勘查工程技术中心进行,主要阴离子(HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-)和阳离子(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})通过离子色谱仪(ICP-MS)进行测定, HCO_3^- 采用酸碱滴定方法测定。

3 结果分析与讨论

3.1 水化学特征

3.1.1 常规离子组成

分别对地表水中水化学指标进行统计分析,所得结果如表 1 所示。研究结果显示:(1)该区域水体 pH 值为 8.1~8.8,平均值为 8.2,整体上呈现弱碱性。(2)TDS 值范围为 237~324 mg/L,平均值为 264 mg/L,而世界河流 TDS 平均值为 115 mg/L^[9],研究区地表水的 TDS 值远远超过了这项指标。(3)水体阳离子平均值呈现 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$,阴离子呈现 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 。其中,阳离子中, Na^+ 质量分数为 45.0%; Ca^{2+} 质量分数为 37.9%;而 Mg^{2+} 质量分数则较少,其值为 21.5%; K^+ 量则非常低,仅占阳离子总量的 6.0%。研究区域地表水体中阴离子则以 HCO_3^- 为主,其质量分数为 56.1%;其次为 SO_4^{2-} ,占阴离子总量的 28.2%; Cl^- 较少,其值为 15.0%,三者占阴离子总量的 89.3%。

3.1.2 Piper 三线图分析

通过 Piper 三线图可表现不同水体水化学组成特征,主要利用水体所含的主要阳离子(Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})和水中所含的主要阴离子(HCO_3^- , Cl^- ,

表 1 濉河符离至顺河流域水化学统计

指标	pH 值	TDS 值	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
平均值	8.2	264	104	77.5	43.9	92.5	175	347	3.50	0.80
极大值	8.8	324	121	91.7	77.1	138	336	446	8.32	1.62
极小值	8.1	237	75.8	68.7	33.1	62.4	84.1	295	0.00	0.52

注:pH 值为无量纲。

SO₄²⁻),采用毫克当量百分数来表示。利用实验数据绘制濉河符离至顺河段地表水 Piper 三线图(图 2)。该区域地表水体的水化学类型主要为 HCO₃⁻·SO₄²⁻-Na·Ca 型,其中阳离子主要分布在左下角,如图 2 所示水体中阳离子 Ca²⁺ 偏高。由图 2 可知,水体中主要阴离子为 HCO₃⁻。经调查,该地区矿产资源丰富,多为白云岩、石灰岩,所研究的区域 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 含量高可能是由于来自碳酸盐的风化溶解,推测水体中的 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 可能来源于白云岩及石灰岩的风化溶解,体现了该区域地表水受碳酸盐岩风化溶解影响较为严重。

析结果如表 2 所示。其中 Ni 元素平均质量浓度最高,达到 16.84 ng/L;其次为 As,质量浓度为 12.40 ng/L;重金属离子平均质量浓度最低的是 Pb,为 0.07 ng/L。由表 2 知,Cr,As,Ni 这 3 种重金属离子最大质量浓度较高,分别为 12.45,21.71,23.42 ng/L,重金属离子质量浓度总体上呈现 Ni>As>Cr>Zn>Cu>Co>Pb。

表 2 濉河水体重金属质量浓度统计

指标	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Ni	Co
最大值	12.45	3.69	5.01	21.71	0.18	23.42	1.61
最小值	5.55	2.50	3.30	6.75	0.01	14.44	0.70
平均值	8.17	3.11	4.04	12.40	0.07	16.84	0.96

3.3 主要离子来源

3.3.1 Pearson 离子相关性分析

利用 SPSS 软件对地表水常规离子进行相关性分析,结果如表 3 所示。研究结果显示 TDS 与 Cl⁻,SO₄²⁻ 和 Mg²⁺ 有较强的相关性,这反映了该区域地表水 TDS 值主要来源于 Cl⁻,SO₄²⁻ 和 Mg²⁺ 的影响,其中 TDS 值与 Cl⁻ 的相关系数为 0.951,与 SO₄²⁻ 的相关系数为 0.975,与 Mg²⁺ 的相关系数为 0.979,即该区域的 TDS 主要来自地表水中的 Cl⁻,SO₄²⁻ 和 Mg²⁺。通过表中数据可发现,Na⁺ 与 HCO₃⁻ 具有显著相关性,即二者的物质来源相同,均来自碳酸岩矿物风化溶解。此外,Na⁺ 还与 NO₃⁻ 具有显著相关性,体现了该区域地表水不仅受岩石风化影响,同时还受到人类活动的影响。

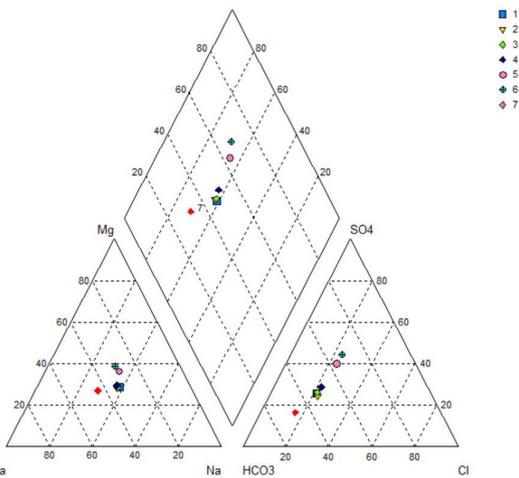


图 2 濉河宿州符离至顺河段地表水主要离子 Piper 三线图

3.2 重金属离子特征

濉河宿州符离至顺河段地表水重金属离子分

表 3 常规离子相关性分析

指标	TDS	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
TDS	1								
Cl ⁻	0.951 **	1							
HCO ₃ ⁻	-0.691	-0.830 *	1						
NO ₃ ⁻	-0.852 *	-0.919 **	0.934 **	1					
SO ₄ ²⁻	0.975 **	0.988 **	-0.762 *	-0.895 **	1				
Na ⁺	0.755 *	0.896 **	-0.960 **	-0.945 **	0.830 *	1			
K ⁺	0.429	0.643	-0.930 **	-0.795 *	0.539	0.909 **	1		
Mg ²⁺	0.979 **	0.967 **	-0.673	-0.826 *	0.990 **	0.756 *	0.429	1	
Ca ²⁺	0.428	0.293	0.268	0.043	0.386	-0.133	-0.495	0.507	1

注: ** 表示 P<0.01; * 表示 P<0.05。

3.3.2 Gibbs 图分析

符离至顺河段 TDS 值为 200~400 mg/L(图 3)。通过实测可知 TDS 最大值为 324 mg/L(表 1), 由于该地区 TDS 值几乎全部低于 300 mg/L, 可知该地区地表水受蒸发-结晶控制影响很小, 主要受岩石风化控制。且岩石风化主要以石灰岩及白云岩等碳酸盐风化为主, 符离 10 月为秋季, 降水少, 地表径流量和降水量少, 地表水被稀释作用影响小, 而受到人为活动影响较大。

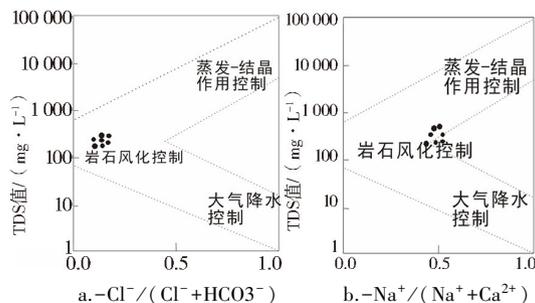


图 3 淮河符离至顺河段地表水 Gibbs 图

3.3.3 离子关系

地表水中 Na^+ 通常与硅酸盐溶解有关, 通常借助 Na^+ 与 Cl^- 的含量关系来研究 Na^+ 的来源^[10]。通常情况下, 受岩石风化影响 Na^+ 与 Cl^- 摩尔比为 1:1, 但由图 4a 可知, 研究区地表水 Na^+ 与 Cl^- 比明显偏离了 1:1。其中 1#~5# 样品 Cl^- 明显富集, 而 Cl^- 主要来源于人类活动影响^[8], 体现该地区受人类活动影响较为明显; 而 6#, 7# 样品表现为 Na^+ 富集, 体现 6# 和 7# 采样点处地表水受硅酸盐矿物风化影响较大。

通常情况下, 地表水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源可通过 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系图来反映^[11], 如图 4b 所示。当 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比值等于 1 时, 可初步判定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐和硅酸盐风化溶解; 当比值大于 1 时, 则地表水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐风化^[11]。由图 4b 可知, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比值始终远远小于 1, 这说明研究区的地表水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐和硫酸盐的溶解。除此之外, 人类活动的影响也是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源。

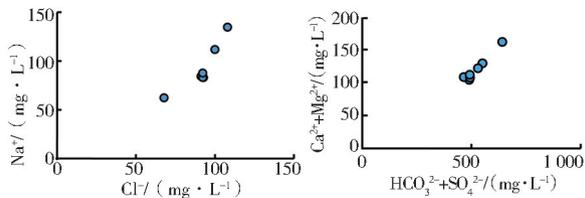


图 4 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系

3.4 重金属污染评价

通过查阅资料, 根据《地表水环境质量标准》(表 4), 所有重金属元素平均值(表 5)均未超过国家地表水水质 I 类指标; 通过对水体中重金属离子浓度的测试分析得知, 在所采取的 7 个样品中, 所有样品均符合国家地表水水质 III 类指标, 部分地区 As 元素质量分数较高。同时, 对比《农业灌溉水标准》(表 6)发现, 该地区重金属离子均未超标, 符合《农业灌溉水标准》中对重金属离子的规定。

表 4 国家地表水水质标准(GB 3838—2002)和饮用水标准值(GB 5749—2006) mg/L

指标	I	II	III	IV	V	饮用水标准值
Cr	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05
Cu	0.01	1.00	1.00	1.00	1.0	1.00
Zn	0.05	1.00	1.00	1.00	1.0	1.00
As	0.05	0.05	0.05	0.10	0.1	0.01
Pb	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.01

表 5 淮河水体重金属平均值 ng/L

指标	Cr	Cu	Zn	As	Pb
平均值	8.17	3.11	4.04	12.40	0.07

表 6 国家农业灌溉水标准(GB 5084—2021) mg/L

指标	Hg	Cr	As	Pb
	≤0.001	≤0.1	≤0.05	≤0.2

单因子指数法是最方便、快捷的环境质量指数评价方法, 无量纲, 能够单独评价各个污染因子, 可统计各污染因子的达标率、超标率、超标倍数、统计代表值等结果, 从而可直接揭示水质状况与评价标准之间的关系^[12], 其评价标准如表 7 所示。单因素指数公式为:

$$P = C/S,$$

式中: P 为 As 污染物指数; C 为 As 污染物实测质量浓度, mg/L; S 为污染物评价标准。

本文通过单因子指数法, 结合《地表水环境质量标准》所给定的 3 类标准限值, 在所测得的样点浓度值基础上对水体 As 污染程度进行评估, 当 As 浓度超过 3 类标准限值时, 即表示 As 超标。淮河宿州流域地表水中 As 质量浓度均在 III 类标准限值中。采样区域 As 检出率达到 100%。

表 7 单因子污染指数评价标准

污染指数范围	$P \leq 1$	$1 < P \leq 2$	$2 < P \leq 3$	$P > 3$
污染水平	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染

由淮河宿州流域的单因子指数评价结果(表 8)

可知,濉河宿州流域的 As 污染整体呈现轻度污染(其中濉河符离段为采样点 1[#]~5[#],顺河段为采样点 6[#]~7[#])(图 1),顺河段的污染指数远远高于符离污染指数,由表 8 中可知,沿河流流向,濉河水体中 As 污染程度逐步加深,且濉河宿州流域顺河段中的水体中 As 污染比重最高,通过单因子指数法得出,濉河顺河段 As 污染较为严重,已经超出饮用水标准限值,这很大程度危害了沿岸居民的身体健 康,影响了居民的正常生活,一般来说,Cr 和 As 主要是农业施用磷肥、含磷复合肥和农药等活动带来的^[13],所以控制该区域农业化肥的使用是降低 As 污染的有效手段。

表 8 As 浓度单因子指数评价结果

水源	濉河符离段		濉河顺河段	
	污染指数	污染水平	污染指数	污染水平
地表水	0.74	清洁	1.89	轻度污染

对比《地表水环境质量标准》发现,5[#]和 6[#]样品中 SO₄²⁻离子质量浓度过高,已经造成水体硫酸盐污染,水体本身已无法饮用。通过对水体检测发现 7 个样品中,硫酸盐质量浓度为 84.1~336 mg/L,硫酸盐质量浓度平均值为 175 mg/L,硫酸盐超标样品为 2 个,超标率为 28.6%。由于采样点附近为居民村庄,推测其可能产生污染的原因为人们生活垃圾排放以及养殖鸡鸭等所造成的水体硫酸盐污染。经调查,流域内工业及生活污水排放量达到 7×10⁵ m³,污水处理率为 15%~20%,从而造成地表水体严重污染。威胁着沿岸居民的生命安全。

利用 SPSS 软件对各重金属进行相关性分析,结果如表 9 所示。由表 9 可知,Cr 与 As 存在中等相关关系;Cr 与 Co, Ni 存在显著相关关系;Cu 与 Zn, Pb 存在相关性十分显著;Zn 与 Pb 相关性显著。结果显示,铜、锌、铅具有显著相关性,推测它们的来源可能相同;铬、钴、镍具有显著相关性,它们的来源也可能相似。

表 9 Pearson 重金属相关性分析

	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
Cr	1						
Co	0.816**	1					
Ni	0.847**	0.982**	1				
Cu	0.489	0.231	0.294	1			
Zn	0.593	0.556	0.595	0.893**	1		
As	0.722*	0.932**	0.856**	0.109	0.403	1	
Pb	0.378	0.306	0.308	0.839**	0.844**	0.284	1

注: ** 表示 P<0.01; * 表示 P<0.05。

4 结论

对濉河宿州流域水化学特征分析及重金属污染情况进行评价,可获得以下结论。

1) 濉河宿州段水体总体呈现弱碱性,水体总溶解固体量值较大,超过了世界河流 TDS 平均值,部分区域水体中 SO₄²⁻质量浓度过高,造成水体硫酸盐污染。其中,地表水体阳离子主要以 Na⁺和 Ca²⁺为主,二者质量分数占阳离子总量的 75.1%;阴离子主要以 HCO₃⁻为主,其质量分数约占阴离子总量的 56.1%。

2) 该区域地表水体的水化学类型主要为 HCO₃·SO₄-Na·Ca 型,水化学离子主要来源于碳酸盐风化溶解以及人类生产生活的综合影响。

3) 结合《地表水水质标准》和《饮用水标准值》,由濉河宿州段的 As 质量浓度单因子指数结果分析可知,濉河宿州段的水体中 As 污染属于轻度污染水平。沿径流方向,濉河宿州顺河段地区 As 质量浓度单因子污染指数远远高于符离段的单因子污染指数。

4) 通过 Pearson 相关性分析,发现该地区铜、锌、铅具有显著相关性,推测它们的来源可能相同;铬、钴、镍具有显著相关性,它们的来源也可能相似。对比《国家农业灌溉水标准》,该地区重金属浓度均在限值范围内。

参考文献:

[1] 解飞.设立宿州符离省级经济开发区的可行性研究报告[J].淮海工学院学报(社会科学版),2011,9(8):19-20.
 [2] 郭瑶.农村土壤重金属污染检测与评价研究[J].环境科学与管理,2018,43(9):167-170.
 [3] 杨柳,宋健飞,宋波,等.主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用[J].环境科学与技术,2015(11):239-245.
 [4] 景一峰,张凤华.蘑菇湖水库水体重金属污染情况分析与评价[J].科技创新与应用,2016(10):151-152.
 [5] 周慧平,高燕,尹爱经.水污染源解析技术与应用研究进展[J].环境保护科学,2014(6):19-24.
 [6] 王志垚,张克峰,刘雷.地下水污染评价中单因子指数法的优化[J].环境工程,2016,34(S1):810-812.816.
 [7] 梁华.宿州市城西水源地地下水化学特征及水质评价[J].科学技术创新,2021(1):47-49.
 [8] 闵宁,任瑾,林曼利.淮北平原区城市浅层地下水化学特征及成因分析——以宿州市为例[J].九江学院学报(自然科学

版), 2018, 33(1): 14-17.

- [9] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003-4010.
- [10] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.
- [11] 石立明. 邯郸黑龙港平原地下水水文地球化学特征及水质评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [12] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 267-277.
- [13] 李文赞, 李叙勇, 王慧亮, 等. 濉阳河主要水环境污染物空间分布特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2814-2819.

(上接第 87 页)

4) 楼盖结构的长跨比 >1.5 时, 正交斜放空腹夹大, 抗变形能力更强。
层板楼盖相较于正交正放空腹夹层板整体刚度更

参考文献:

- [1] 黄勇, 马克俭, 张华刚, 等. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖体系的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 1997(6): 55-64.
- [2] 田子东, 孙铭辰, 申波, 等. 多层大跨度钢筋混凝土空腹夹层板楼盖施工方法[J]. 四川水泥, 2020(10): 160-161.
- [3] 刘盼盼, 申波, 马克俭, 等. 影响空腹夹层板起拱后内力的因素分析[J]. 混凝土, 2019(11): 154-158+162.
- [4] 刘盼盼, 王惠, 申波, 等. 起拱对钢筋混凝土空腹夹层板内力影响的参数化分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 964-976.
- [5] 徐增茂, 马克俭, 郑晋阳, 等. 大跨正交正放空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 911-919.
- [6] 马克俭, 张华刚, 郑涛. 新型建筑空间网格结构理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 才琪, 马克俭, 刘卓群. 多层大跨度蜂窝形钢空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 106-109+125.
- [8] DB22/48-2005 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程[S]. 贵阳: 贵州省建筑厅, 2005.

(上接第 91 页)

- [3] 刘东甲. 完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 683-687.
- [4] MIDDENDORP P, REIDING F J. Determination of discontinuities in piles by TNO integrity testing and signal matching technique[C]//Proceeding of the Third International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piles. Rotterdam: AA Balkema, 1988: 33-43.
- [5] 陈凡, 王仁军. 尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 92-96.
- [6] 陈义全, 任志国, 刘东甲. 非完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2004, 27(10): 1210-1214.
- [7] 刘东甲. 指数型变截面桩中的纵波[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1066-1071.
- [8] JIANG Jing, LIU Dongjia, LU Zhitang, et al. A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 345-352.
- [9] 姜静, 姚志刚, 陈钦元, 等. 双速度法在承台桩系统中的完整性检测研究[J]. 安徽广播电视大学学报, 2017, 176(1): 124-128.
- [10] 刘东甲. 纵向振动桩侧壁切应力频域解及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 544-546.