

洛阳市大气 PM₁₀, NO₂ 和 SO₂ 浓度变化特征

刘玉清¹, 徐贤英², 黄敏¹, 刘茜¹

(1. 武汉理工大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 河南省洛阳市环境监测站, 河南 洛阳 471000)

摘要: 洛阳是我国工业重地, 长期受大气污染困扰。利用 2014 年 1 月—2016 年 12 月的 PM₁₀, NO₂ 和 SO₂ 监测数据, 分析了洛阳市不同大气污染物的日均值变化、月均值变化、年均值以及各污染物浓度与气候因素的相关性分析。结果表明: 洛阳市空气质量首要污染物为 PM₁₀, 2014—2016 年平均浓度分别为 $(119.4 \pm 64.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(124.4 \pm 68.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(129.0 \pm 91.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 超过国家环境空气质量二级标准; NO₂ 次之, 而 SO₂ 并未超过国家环境空气质量二级标准。2014—2016 年, 三种污染物浓度的月变化趋势相同, 呈现 U 型变化; PM₁₀, NO₂ 及 SO₂ 三种污染物冬季浓度最大, 夏季浓度最低; PM₁₀ 和 NO₂ 年均污染浓度有增加趋势, SO₂ 年均污染浓度逐年下降。各种气象要素与大气污染物的 Pearson 相关性分析显示, 风速、气压、气温、水汽压的影响较为显著, 而平均相对湿度的影响相对较弱。大气污染物浓度受到了各种气象因素综合影响。

关键词: 大气污染物; PM₁₀; NO₂; SO₂; 洛阳市

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0178-05

Characteristics of Change in Concentrations of Atmospheric Pollutants in Luoyang, He'nan Province

LIU Yuqing¹, XU Xianying², HUANG Min¹, LIU Qian¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Environmental Monitor Station, Luoyang, He'nan 471000, China)

Abstract: To understand atmospheric pollution levels and their temporal variation in Luoyang, the concentrations of PM₁₀, SO₂ and NO₂ in that city were measured continuously by the monitoring equipments from January, 2014 to December, 2016. The results showed that the primary pollutant was PM₁₀, the annual average concentrations were $(119.4 \pm 64.5) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $(124.4 \pm 68.1) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $(129.0 \pm 91.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$ from 2014 to 2016, respectively. Based on the National Environmental Air Quality Standard of China, all the levels of PM₁₀ during the three years exceeded the secondary grade; sequentially, NO₂ was a bit outside the range of the secondary grade, while SO₂ was not over the secondary grade. The monthly variations of average concentrations of three pollutants were similar, and their trends appeared U-shape. The three pollutant concentrations were the highest in summer and the lowest in winter. Gradually, annual average concentrations of PM₁₀ and NO₂ were both rising while annual average concentration of SO₂ was reducing year by year. Pearson analysis indicated that air pollutants were significantly correlated with wind speed, air pressure, air temperature and vapor pressure, and weakly correlated with average relative humidity. It is not a single role that various meteorological factors have the influence on the air pollutant variation, but the combination of those meteorological factors do.

Keywords: atmospheric pollutants; PM₁₀; NO₂; SO₂; Luoyang City

随着洛阳市社会经济的快速发展, 空气污染问题面临严峻的挑战^[1], 它严重威胁着城市生态环境及居民身体健康, 是不容忽视的热点问题之一^[2-4]。因此,

全面展开区域大气污染物研究对人体健康和可持续发展均具有重要的理论与现实意义^[5-7]。在我国当前大气污染物研究中, 主要集中在东部地区^[8-9]、京—

津—冀^[10-11]、长江三角洲^[12-13]及珠江三角洲^[14]等经济发达的城市,而对中国其他中部工业城市大气污染物特征的研究比较罕见,本文获取洛阳市 2014 年 1 月—2016 年 12 月大气中典型污染物 PM₁₀, NO₂ 和 SO₂ 的观测资料及离监测站点最近的气象站数据,详细分析洛阳市大气污染物浓度日均、月均、季均、年均变化特征及其与气象因素之间的关系,以期更进一步了解该地区大气污染状况,为全面分析与评价洛阳市空气污染状况提供新的途径,并为制定有效的大气污染治理措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 监测站点概况

洛阳市位于河南省西部,地处东经 111°8′—112°59′,北纬 33°35′—35°05′,地理条件优越,位于暖温带南缘向北亚热带过渡地带,四季分明,气候宜人,年平均气温 14.2℃,降雨量 546 mm。现辖偃师市、孟津、新安、洛宁、宜阳、伊川、嵩县、栾川、汝阳等一市八县和涧西、西工、老城、瀍河、洛龙、吉利六个城市区。“十一五”期间洛阳市城区环境空气自动监测点位与“十五”期间相比明显增加。其中 2003—2005 年环境空气自动监测点位为 3 个,分别为“耐火厂”、“市党校”和“豫西宾馆”;2006 年增至 5 个,分别为“中信二小”、“市党校”、“原市监测站”、“豫西宾馆”和“开发区管委会”;从 2007 年开始又增加了“河南林校”和“新市委”2 个点位,目前共计 7 个城市环境空气自动监测点位。7 个环境空气自动监测点位分别布设于 5 个行政区内,其中“中信二小”、“党校”和“开发区管委会”位于涧西区,“原市监测站”位于西工区,“豫西宾馆”位于老城区,“河南林校”位于瀍河区,“新市委”位于洛龙区。洛阳市是中国典型的工业城市代表,且地形如盆地,因此长期受大气污染困扰。本文使用洛阳市环境保护局提供的 2014 年 1 月至 2016 年 12 月的 PM₁₀, NO₂ 和 SO₂ 监测数据及中国气象数据网提供的气象数据展开分析。

1.2 数据处理

采用 SPSS 20.0 进行数据统计和分析,Origin Pro 8.0 和 HemI Windows 1.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 污染物浓度日均变化

图 1 给出了洛阳市城区 2014—2016 年三年 PM₁₀, NO₂ 和 SO₂ 的逐日变化特征。从图中可以看出,三种污染物逐日变化趋势大致相同,1 月和 12 月污染物浓度最高,越趋于中间污染物浓度越低。其

中:(1) 2014—2016 年 PM₁₀ 日均浓度呈现两头高,中间低的规律,在 1、2、3、11、12 月浓度波动较大,4—10 月较平稳,PM₁₀ 日均最高值分别出现在 2014 年 3 月、2015 年 12 月和 2016 年 1 月,最小值则出现在 2014 年 9 月、2015 年 11 月和 2016 年 8 月。通过 PM₁₀ 日均变化(图 1)可得出,洛阳市 PM₁₀ 2014 年共有 83 天超过国家环境空气质量二级标准,超标率达 22.7%;2015 年超标天数为 100 天,超标率为 27.4%;2016 年比 2015 年多 6 天超标,超标率为 29.0%,PM₁₀ 污染天数逐年增长,污染愈加严重。(2) NO₂ 日均变化趋势与 PM₁₀ 相同:在 1 月,2 月,3 月,11 月,12 月波动明显,中间月份平稳。日均最高值出现在 2014 年 1 月、2015 年 12 月和 2016 年 12 月,最小值出现在 2014 年 12 月、2015 年 8 月和 2016 年 1 月。NO₂ 污染程度较弱,在 2014 年全年仅 1 天超过国家环境空气质量二级标准,超标率为 0.03%;2015 年有 19 天超标,超标率为 5.2%;2016 年有 27 d 超标,超标率为 7.3%,NO₂ 污染程度有加剧的趋势。(3) SO₂ 全年变化明显,两头月份浮动明显,中间月份浓度稳定。日均最高值出现 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 2016 年 2 月,日均最低值在 2014 年 9 月、2015 年 6 月和 2016 年 7 月出现。SO₂ 污染逐年减轻,2014 年全年仅 6 天超过国家环境空气质量二级标准,达标率为 98.4%;2015 年仅 1 天,达标率为 99.7%,2016 年全年 SO₂ 日均浓度均达到国家环境空气质量二级标准,达标率为 100%。综上所述,洛阳市大气污染物超标最严重的是 PM₁₀, NO₂ 次之,SO₂ 未超标。

2.2 污染物浓度月均变化

洛阳市大气污染物月均变化见图 2。PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 均呈现典型的 U 型变化特征,从春季开始逐渐降低,在夏季或秋季达到谷值,之后开始回升,冬季达到一个峰值。2014—2016 年,PM₁₀ 月均最高值均是 1 月,其中 2016 年的峰值(243.8±127.7) μg/m³ 最大,比 2014 年和 2015 年最高值分别高 23.2%和 28.2%;2016 年 8 月 PM₁₀ 平均浓度最小,比 2014 年和 2015 年的最小月均值分别减少了 35.9%,26.2%。NO₂ 月均浓度变化趋势与 PM₁₀ 相同,在 7 月达到谷值,分别是(32.5±7.4) μg/m³, (23.8±5.6) μg/m³ 和 (23.4±4.0) μg/m³;最大月均浓度分别是 2014 年 12 月(54.1±13.0) μg/m³, 2015 年 1 月(67.7±25.2) μg/m³ 和 2016 年 1 月(68.8±26.5) μg/m³。SO₂ 全年单谷变化趋势明显,7 月为谷值,其中 2016 年谷值最小(11.85±5.2) μg/m³,仅是 2015 年、2014 年月均最小值的 71.1%和 56.0%;全年月均最大值分别是 2016 年 1 月(76.6±23.0) μg/m³, 2015 年 1 月(99.1±26.2) μg/m³ 以及 2014 年 12 月(113.5±54.9) μg/m³。

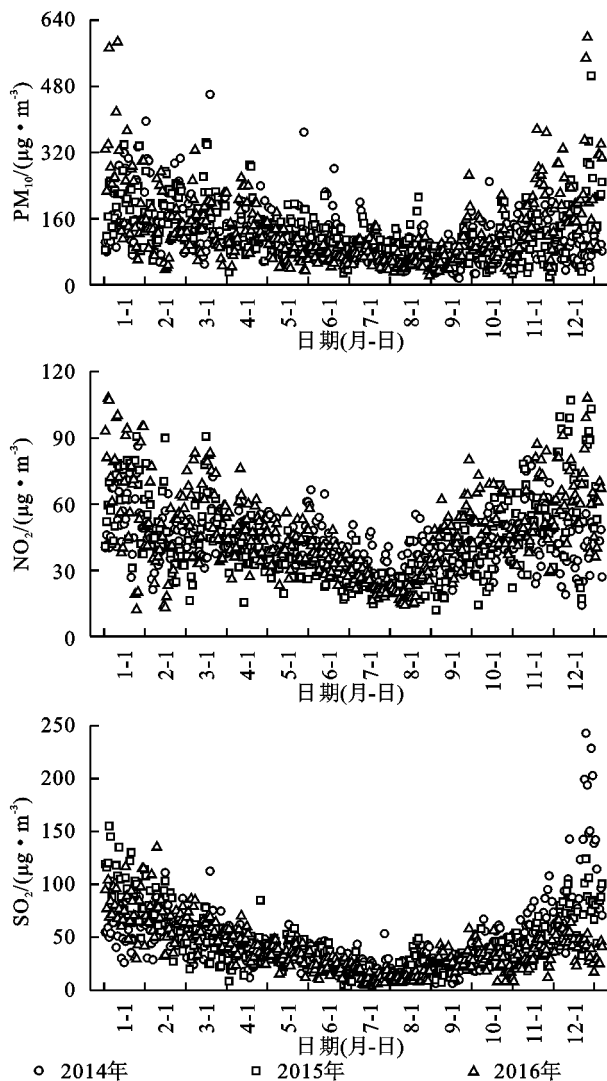


图 1 2014—2016 年大气污染物浓度逐日变化

2.3 污染物浓度季节变化

2014—2016 年大气污染物浓度季节性变化见表 1。(1) 2014—2016 年 PM_{10} 年均浓度分别为 $(119.3 \pm 64.5) \mu g/m^3$, $(124.4 \pm 68.1) \mu g/m^3$, $(129.0 \pm 91.2) \mu g/m^3$, 均超过了国家环境空气质量二级标准, 呈逐年增长趋势。2014 年和 2015 年春季和冬季 PM_{10} 显著高于夏秋两季, 2016 年冬季浓度最高, 春秋次之, 夏季最低。(2) NO_2 年均浓度波动不大, 分别为 $(42.4 \pm 11.7) \mu g/m^3$, $(42.0 \pm 19.3) \mu g/m^3$, $(46.7 \pm 19.9) \mu g/m^3$, 超过国家环境空气质量二级标准。2014 年 NO_2 冬季平均浓度最高, 春秋次之, 夏季最低, 2015 年、2016 年 NO_2 季节变化趋势与 2014 年一致; 且 2015 年和 2016 年冬季 NO_2 平均浓度显著高于 2014 年冬季, 而夏季 NO_2 平均浓度低于 2014 年。(3) 2014 年 SO_2 平均浓度为 $(47.5 \pm 31.9) \mu g/m^3$, 2015 年为 $(44.1 \pm 28.1) \mu g/m^3$, 2016 年为 $(37.9 \pm 23.1) \mu g/m^3$, 未超过国家环境空气质量二级标准, 年均浓度呈逐年降低趋势, 这说明洛阳市对大气污染

已经采取了一定治理措施, 并且已经初见成效。

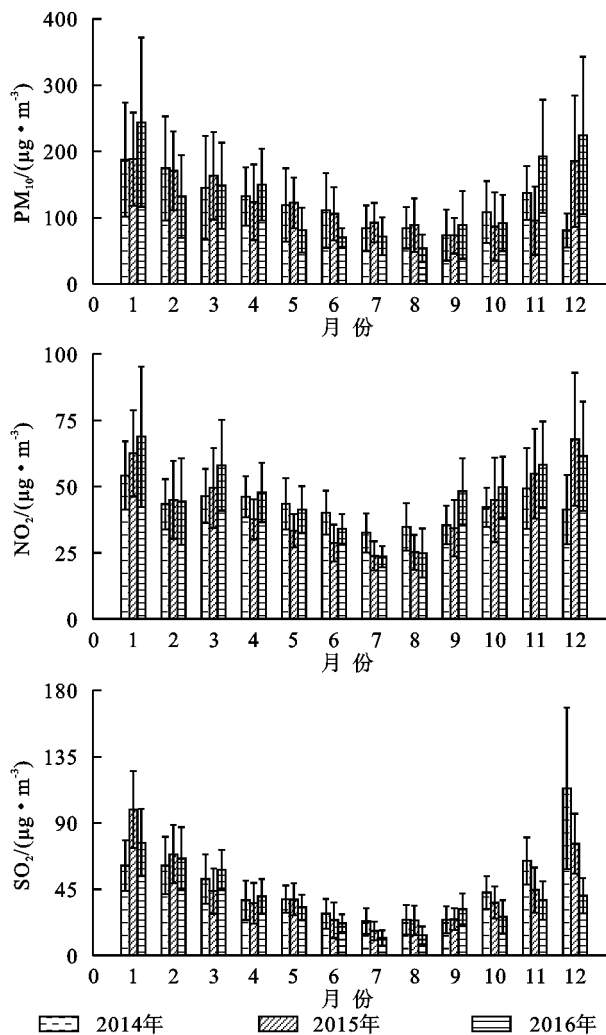


图 2 2014—2016 年大气污染物浓度逐月变化

2014—2016 年 SO_2 冬季平均浓度最高, 春秋次之, 夏季最低; 2016 年 SO_2 夏季和冬季平均浓度显著低于 2014 年和 2015 年, 春季浓度没有明显差异。综上所述, 大气污染物浓度呈现明显的季节性变化: 2014—2016 年, 冬季大污染最为严重, 春秋次之, 夏季较轻。 SO_2 主要来源为工业生产与燃烧排放, 冬季燃煤供暖而产生的大量排放, 这使得冬季 SO_2 污染最严重^[15]。洛阳市的供暖时间为 11 月中旬至次年三月底, 因此 SO_2 在冬季污染最严重, 在采暖期减少污染物的排放是我们亟待解决的问题。洛阳市城市化建设进程不断加进, 城市基础设施建设增多, 建筑、拆迁和道路施工中导致大量的扬尘产生, 这对 PM_{10} 污染具有极大的负面影响。工业废气、汽车尾气等也是大气污染物的主要来源^[16]。春夏两季风速大, 可以加速污染物的扩散稀释^[17], 但同时也会产生大量的扬尘, 对大气颗粒物浓度有影响。洛阳市冬季化石燃料使用增多, 污染物来源增多; 同时冬季干旱少雨, 温度低、气压高等气候特征, 会导致扩散缓慢、清洗作用减弱, 致使大气污染加重。反过来, 夏季

降雨集中,除尘效果明显,化石燃料使用减少,使得夏季大气污染减弱,空气质量良好。

表 1 2014—2016 年大气污染物在不同季节的浓度

年份	污染物	PM ₁₀ /	NO ₂ /	SO ₂ /
		($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
2014	春	132.0±61.5bA	45.3±9.3bB	42.5±14.9bA
	夏	92.8±43.5aB	35.8±8.7aB	25.1±9.8aC
	秋	106.3±49.1aB	42.2±11.9bA	43.7±20.4bB
	冬	146.4±83.3bA	46.3±13.2cA	79.1±43.1cB
	全年	119.3±64.5	42.4±11.7	47.5±31.9
2015	春	136.5±57.7bA	40.2±12.4bA	39.1±13.8bA
	夏	95.4±37.5aB	25.8±6.6aA	21.4±10.2aB
	秋	84.9±45.3aA	44.7±16.8bA	35.0±14.1bA
	冬	181.7±78.3cB	58.5±23.4cB	81.6±25.7cB
	全年	124.4±68.1	42.0±19.3	44.1±28.1
2016	春	126.1±61.3bA	49.0±14.5bB	43.6±15.7cA
	夏	65.0±23.2aA	27.4±8.1aA	15.8±7.2aA
	秋	124.1±78.2bB	52.0±14.1bA	31.6±12.4bA
	冬	201.4±117.1cB	58.5±23.7cB	60.9±24.5dA
	全年	129.0±91.2	46.7±19.9	37.9±23.1

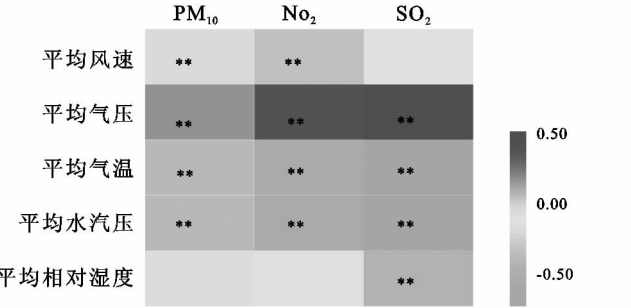
注:不同的小写字母表示同一年份不同季节之间差异显著($p<0.05$);不同的大写字母表示同一季节不同年份之间差异显著($p<0.05$)。

2.4 污染物浓度与气象因素的相关性分析

气象条件如风速、气压、温度、水汽压及相对湿度对近地面大气污染物浓度具有显著作用。图 3 是洛阳市 2014—2015 年大气污染物日均浓度与各气象因素日均值的相关系数。洛阳市常年平均风速较大,为 18.73 m/s。由图 3 可见,平均风速对大气污染物浓度的影响也较大,其中,它与 PM₁₀、NO₂ 的浓度呈显著负相关($p<0.01$),还与 SO₂ 浓度呈不明显的负相关。风速增大会促进大气污染物的扩散,其对大气污染物浓度的影响主要是稀释作用。谢雨竹等^[18]在分析成都市夏季大气污染物变化特征时,风速与 PM₁₀ 和 NO₂ 呈显著负相关。气压与 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 共 3 种大气污染物浓度均呈显著正相关($p<0.01$)。这是因为低压系统下,内部的气流发生垂直上升运动,导致风速增大,从而稀释大气污染物浓度;而在高压作用下,内部气流下沉,使得污染物沉积并集聚,污染物浓度则会升高。陶双成等^[19]在对北京市采暖期环境空气质量进行调研时,也发现微风无持续风向的稳定天气大气污染物扩散不明显,容易累积。

图 3 显示,气温与 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 三种大气污染物浓度呈现显著负相关关系。这是由于当地面温度升高时,大气层结稳定度会降低,使得近地层污染物浓度下降;反之,近地层的大气污染物浓度会升高。水汽压与 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 三种大气污染物浓度均呈显著负相关,当大气中水汽增多时,水汽压便增大,水汽增多也会促进大气污染物的凝聚,从而降低污染物浓度;反之,大气污染物浓度就会升高。平均相对湿度与大气污染物浓度相关性不明显,与

PM₁₀ 和 NO₂ 浓度呈负相关,与 SO₂ 呈显著负相关。董继元等^[20]发现高颗粒污染物浓度大多出现在低湿天气,但高湿度非降雨天气颗粒污染物也容易积聚。主要是由于空气中湿度增加导致水汽含量增加,而水汽含量的增加会强化大气污染物的吸附作用使得悬浮颗粒物沉降到地面,最终降低大气污染物浓度降低。但在雾天时,由于存在逆温现象使得污染物不易扩散,所以虽然雾天相对湿度增大,但污染物浓度还是增加。



注: * * 表示相关性极显著, $p<0.01$ 。

图 3 2014—2015 年大气污染物浓度日均值与气象因素日均值的相关性

3 结论

- (1) 洛阳市 2014—2016 年 PM₁₀ 污染最严重, NO₂ 次之, PM₁₀ 和 NO₂ 污染有逐年加剧趋势; SO₂ 均浓度达到国家环境空气质量二级标准, 未造成污染。
- (2) 三种大气污染物的月变化趋势相同, 表现出明显的 U 型变化, 峰值均出现在冬季, 谷值出现在夏季。
- (3) 平均气压与大气污染物浓度呈显著正相关, 其他气象因素与大气污染物均呈负相关, 但相关性强度不同。其中风速、气压、气温、水汽压对大气污染物浓度均有显著影响, 而平均相对湿度影响相对微弱。各种气象因素综合影响大气污染物的浓度。

参考文献:

[1] 禹东晖, 寿绍文, 孟丽丽, 等. 洛阳市城市环境气象监测预报服务研究[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(2): 55-60.

[2] Hu X, Waller L A, Lyapustin A, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the Southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 220-232.

[3] 沈仙霞, 刘朝顺, 施润和, 等. 上海不同污染等级下气溶胶光学特性垂直分布特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 582-591.

[4] Liu Y, Sarnat J A, Kilaru A, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern united states using satellite remote sensing[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(9): 3269-3278.

[5] Hirtl M, Mantovani S, Krger B C, et al. Improvement

- of air quality forecasts with satellite and ground based particulate matter observations[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84: 20-27.
- [6] You W, Zang Z L, Zhang L F, et al. A nonlinear model for estimating ground-level PM₁₀ concentration in Xi'an using MODIS aerosol optical depth retrieval[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 168: 169-179.
- [7] Tian J, Chen D. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114 (2): 221-229.
- [8] Chen Y, Shi R, Shu S, et al. Ensemble and enhanced PM₁₀ concentration forecast model based on stepwise regression and wavelet analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74: 346-359.
- [9] Xue D, Yin J. Meteorological influence on predicting surface SO₂ concentration from satellite remote sensing in Shanghai, China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2014, 186(5): 2895-2906.
- [10] Wang S, Xing J, Chatani S, et al. Verification of anthropogenic emissions of China by satellite and ground observations[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (35): 6347-6358.
- [11] 王中挺, 王子峰, 厉青, 等. 环境一号卫星在监测大气 PM₁₀ 中的应用[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(2): 202-206.
- [12] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 质量浓度的特征及其相关性[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(1): 10-16.
- [13] Hu J, Wang Y, Ying Q, et al. Spatial and temporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95(1): 598-609.
- [14] Kong X Z, He W, Qin N, et al. Comparison of transport pathways and potential sources of PM₁₀ in two cities around a large Chinese lake using the modified trajectory analysis [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 122 (3): 284-297.
- [15] 周瑞, 辛金元, 邢立亭, 等. 唐山工业新区冬季采暖期大气污染变化特征研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1874-1880.
- [16] 宁海文, 吴息. 西安市区大气污染时空变化特征及其与气象条件关系[J]. *陕西气象*, 2005(2): 17-20.
- [17] 李会霞, 史兴民. 西安市 PM_{2.5} 时空分布特征及气象成因[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 266-271.
- [18] 谢雨竹, 潘月鹏, 倪长健, 等. 成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35 (4): 975-983.
- [19] 陶双成, 邓顺熙, 高硕哈, 等. 北京采暖期典型区域环境空气污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(11): 1741-1747.
- [20] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 兰州市大气相对湿度与 PM₁₀ 浓度和大气能见度的相关性分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1995-2001.

~~~~~  
(上接第 177 页)

- [5] 刘宇峰, 原志华, 封建民, 等. 基于地表湿润指数的 1959—2014 年陕西省地表干湿时空变化特征[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(6): 1186-1196.
- [6] 王芳芳, 魏勇. 石河子垦区冬小麦生育期干旱变化特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 238-247.
- [7] 王莺, 李耀辉, 姚玉璧, 等. 石羊河流域地表干湿变化的时空分布特征[J]. *资源科学*, 2013, 35(10): 2112-2120.
- [8] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 中国西南干旱对气候变暖的相应特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1409-1417.
- [9] 张秋劲. 若尔盖国家级生态功能保护区可持续发展研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [10] 刘红玉, 白云芳. 若尔盖高原湿地资源变化过程与机制分析[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 810-818.
- [11] 李斌, 董锁成, 江晓波, 等. 若尔盖湿地草原沙化驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 112-120.
- [12] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92.
- [13] 中国气象局. GB/T20481—2006. 气候干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [15] 刘新安, 于贵瑞, 何洪林, 等. 中国地表净辐射推算方法的研究[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 139-145.
- [16] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. *气象学报*, 1963, 33(1): 78-96.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [18] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [19] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [20] 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 近 46 年青藏高原干湿气候区动态变化研究[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 499-507.
- [21] 王建兵, 汪治桂, 王素萍. 1961—2010 年甘肃合作地区草地潜在蒸散量及地表湿润度变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(11): 159-164.
- [22] 杨秀海, 卓嘎, 边多. 藏西北高寒牧区气候特征及草地退化原因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 113-118.