

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH₄浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM₁₀中多环芳烃的污染特征及来源分析 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H₂S废气性能研究 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO₃⁻的存储和运移 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC_s)产生机制研究 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源

李小飞, 张明军*, 马潜, 李亚举, 王圣杰, 汪宝龙

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 依据全球大气降水同位素观测网络(GNIP)中我国东北地区的月大气降水氢氧稳定同位素资料,并结合相关气象资料,分析了该地区大气降水稳定同位素时空分布特征及其影响因子,并建立了局地大气水线方程.结果表明,东北地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体上较低,在时间变化上,表现为冬低夏高;从空间分布来看,由南至北加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈减小趋势;降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度线性关系显著,而与降水量则不存在线性关系,利用降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量、高程、经度和纬度等气候因子建立的多元线性回归关系可以对降水 $\delta^{18}\text{O}$ 进行定量估算;采用HYSPLIT 4.9模型对GNIP观测点水汽来源进行追踪,气团聚类轨迹表明,该区全年有两条水汽路径,分别为西风带输送的大西洋、极地北冰洋冷湿水汽和太平洋暖湿水汽.

关键词: 大气降水; 稳定同位素; 同位素效应; 气团轨迹; 东北地区

中图分类号: X142; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-2924-08

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources

LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, LI Ya-ju, WANG Sheng-jie, WANG Bao-long

(College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the data of the hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation over Northeast China provided by the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and the meteorological statistics, the spatial and temporal variations of stable isotopes in precipitation and their influencing factors were analyzed and the Local Meteoric Water Line (LMWL) was established. The results were as follows: $\delta^{18}\text{O}$ value was low in winter and high in summer; the spatial distribution showed that the weighted $\delta^{18}\text{O}$ value decreased from the south to the north; the linear relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature was significant, but no linear relationship was found for the precipitation amount; $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation can be evaluated quantitatively based on a multiple linear regression equation with $\delta^{18}\text{O}$ and related parameters (temperature, precipitation amount, elevation, longitude and latitude). The water vapor source of the sampling sites was tracked by HYSPLIT 4.9 model, and the modeled trajectory of vapor source indicated that there were two main paths, including the cold wet water vapor from the Atlantic Ocean and the Arctic Ocean via Westerlies, and the warm one from the Pacific Ocean.

Key words: precipitation; stable isotopes; isotope effects; water vapor trajectory; Northeast China

水循环是联系陆地表层各圈层的纽带与核心,同位素作为自然水体中的重要组成部分,尽管其所占比例很小,却非常敏感地响应着环境的变化,并记载着水循环演化的历史信息.氢氧稳定同位素作为研究水循环的示踪元素,不仅在不同的水体中存在差异,并且依赖于温度、降水量、经度和纬度等因子^[1-4],因而通过观测其丰度的变化会引导人们深入认识地球化学和水循环过程^[4].大气降水是陆地水资源的根本来源,对其氢氧稳定同位素组成及比率大小的分析有利于判别不同区域的水汽来源^[5],也可以反映大气水汽循环的整个历史^[2,4].

为了研究全球降水稳定同位素的分布特征,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)和世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)于1961年成立了全球大气降水同位素网络(Global Network of Isotopes in

Precipitation, GNIP),我国于1983年开始加入该计划^[5,6].基于科学研究的需要,2004年我国又以中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)各野外台站为依托,建立了中国大气降水同位素网络(Chinese Network of Isotopes in Precipitation, CHNIP),系统地对 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行观测^[7-9].我国大气降水稳定同位素研究始于1966年珠穆朗玛峰科学考察^[10],至今,针对整个青藏高原^[11-15]、西北地区^[16-19]、西南地区^[20-22]、东部季风区^[23-24],乃至全国^[6,25-27]的大气降水稳定同位素分布特征、同位素效应、水汽输送过程、变化规

收稿日期: 2011-12-19; 修订日期: 2012-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161012); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951003)

作者简介: 李小飞(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: geoli2010@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

律与机制等已取得了一系列重要的认识.

东北地区(118°53′~135°05′E, 38°43′~53°34′N)地处欧亚大陆东缘,属于典型的温带大陆性季风气候,是一个较为完整而又相对独立的自然地理区域^[28],行政区划上的东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁三省(图1).分析该区大气降水稳定同位素组成,掌握其时空分布规律,可以为利用降水稳定同位素分析水汽来源及输送路径提供实证,同时对于深入理解中高纬度地区的水文循环过程也具有积极的意义.

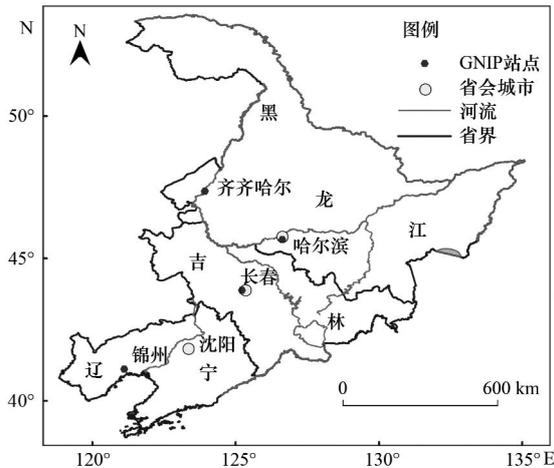


图1 研究区概况与 GNIP 观测点位置分布示意

Fig. 1 Locations of the study area and GNIP stations in Northeast China

1 数据与方法

1.1 同位素数据

本研究大气降水中氢氧稳定同位素的数据主要来源有两部分:一部分来自全球降水同位素观测网 GNIP(中国的齐齐哈尔、哈尔滨、长春、锦州、烟台、石家庄、天津和包头,以及国外的清州、浦项、乌兰巴托、雅库茨克、巴格达林、伊尔库兹克、哈巴罗夫斯克和捷尔涅伊);一部分源自于中国大气降水同位素网络 CHNIP(三江、海伦、长白山和沈阳)^[23].本研究分析主要选取位于东北地区的齐齐哈尔、哈尔滨、长春、锦州的观测点资料,CHNIP 资料和 GNIP 非东北地区资料则作为辅助点应用于东北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分析.观测点资料主要包括降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值以及降水量、温度、水汽压、经纬度、高程等.氢氧稳定同位素的比率以相对于标准平均大洋水(standard mean ocean water, SMOW)的千分差,即国际规定统一采用待测样品中某元素的同位素比值与标准同种同位素的相

对千分差作为量度.表示为如下形式:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = [R_{\text{样品}}/R_{\text{SMOW}} - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R_{\text{样品}}$ 为降水样中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值, R_{SMOW} 为 SMOW 中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值.

降水中氢氧稳定同位素的加权平均值为:

$$\delta_{(w)} = \sum P_i \delta_i / \sum P_i \quad (2)$$

式中, $\delta_{(w)}$ 为加权平均值, P_i 为降水量, δ_i 为其相应的同位素值.

1.2 气团轨迹分析

气团轨迹是指大气气团在一定时间内的运动路径,可以用来分析降水水汽团的来源和传输途径^[29].本研究中的空气轨迹采用美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)空气资源实验室(Air Resources Laboratory, ARL)开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)进行计算.该模型使用的气象资料来自于美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)的全球再分析资料(global reanalysis),空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,由 NOAA 提供.

2 结果与分析

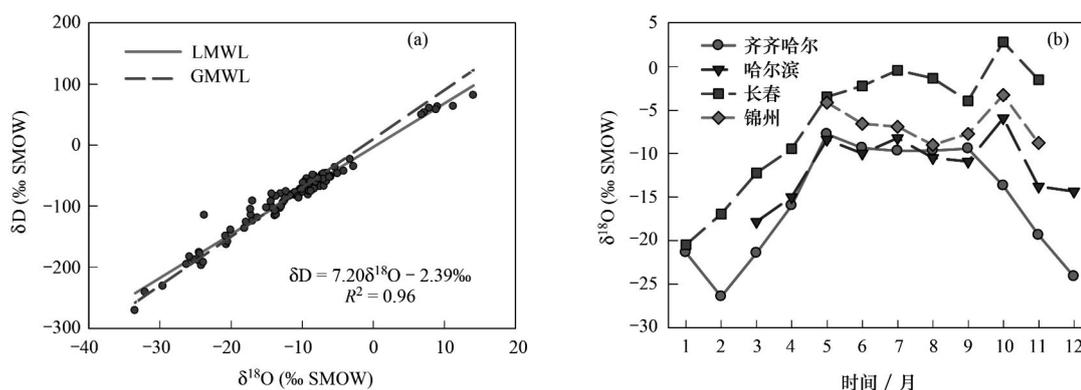
2.1 东北地区大气降水线方程

全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL)为各局地大气降水同位素的组成提供了基准,其中斜率反映两类稳定同位素 D 和 ^{18}O 分馏速率的对比关系,常数项指示氘对平衡状态的偏离程度^[30].

由于从水汽源区到雨滴降落,影响稳定同位素分馏的因子之间存在差异,因此各地大气水线(local meteoric water line, LMWL)是不同的.利用 GNIP 在东北地区观测点的月大气降水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 构成的局地大气降水线为[图2(a)]:

$$\delta\text{D} = 7.20\delta^{18}\text{O} - 2.39\text{‰} \quad (3)$$

该区 LMWL 的斜率和截距均偏离全球的平均水平,斜率稍小于 8 表明该地区降水的水汽来自于具有不同氢氧稳定同位素比率的源地^[6],同时也反映了其降水历经了一定的蒸发过程.图2(a)中 GMWL 与 LMWL 的交点($\delta^{18}\text{O} = -15.49\text{‰}$, $\delta\text{D} = -113.92\text{‰}$),可近似反映出水汽源的原始平均氢氧稳定同位素组成.由于研究区大气降水中氢氧稳

图2 东北地区局地大气降水线方程及观测点 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间分布Fig. 2 LMWL and temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in Northeast China

定同位素存在如上线性关系,以下讨论主要以 $\delta^{18}\text{O}$ 为主.

2.2 东北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时空变化

2.2.1 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

通过东北地区 GNIP 观测点资料可知, $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围较大, 总体偏低, 介于 $-26.42\text{‰} \sim 2.92\text{‰}$ 之间. 其季节变化表现为, 1~5 月不断增大, 6~9 月较稳定, 10~12 月逐渐减小, 极大值出现在 5 月和 10 月, 曲线呈双峰状 [图 2 (b)]. Gibson 等^[31] 指出, 季节性变化在寒冷地区尤为显著, 因为这些地区冬季的降水通常十分贫化并且比夏季降水时的同位素组分变化更大.

齐齐哈尔、哈尔滨、长春和锦州月平均降水量

和温度的季节变化如图 3 所示. 各观测点 $\delta^{18}\text{O}$ 的相对高值均出现在降水量较多的季节, 其中 $\delta^{18}\text{O}$ 的极大值分别出现在 5 月和 10 月. 5 月之后, 降水量、温度显著增加, 但降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 却有较小波动, 呈减小的趋势, 10 月再次达到极大值. $\delta^{18}\text{O}$ 的最小值出现在温度较低的冬季, 但其最大值并未与温度的最大值相对应, 而是分别出现在 5 月 (齐齐哈尔) 和 10 月 (哈尔滨、长春和锦州). 长春大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 在 7 月出现了次高值, 并与温度的最高值相对应, 由于温度较高, 降水量小且蒸发强烈, 降水中高的 $\delta^{18}\text{O}$ 反映了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度效应. 之后, 随着冬季风的逐渐加强, 温度以及湿度显著减小, 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 减小.

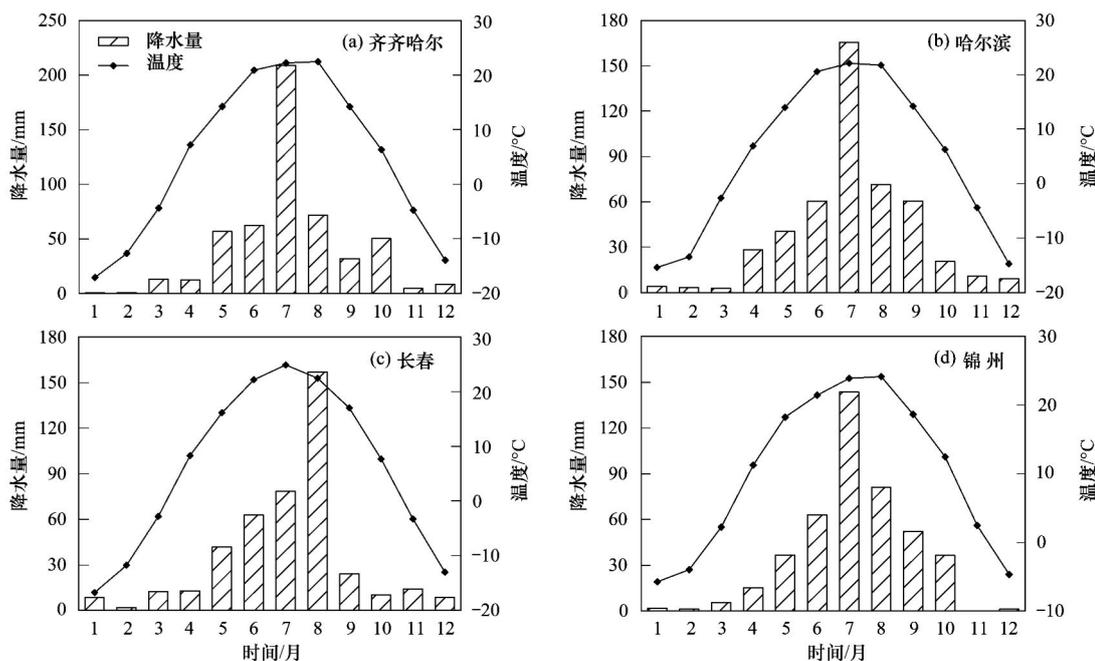


图3 观测点月平均降水量和温度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of precipitation amount and air temperature

综上,东北地区夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高,冬季较低,而大致与温度的周期性变化相同.这是由于随着纬度的升高,温度不断降低,使得气团向极地运动时可产生降水的水汽总量也持续减少,导致降水中重同位素的含量的逐渐衰竭^[32].同时,由于受季风气候的影响,5~10月期间来自海洋的气团具有湿度大、蒸发弱、降水量大的特点,因此这期间 $\delta^{18}\text{O}$ 出现较小波动,值相对较低,最大值也并非与温度的最大值相对应.

2.2.2 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随空间的变化

根据公式(2)计算得出该区 GNIP 观测点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的加权平均值,并在 ArcGIS 软件中采用样条函数法对其进行空间插值分析,可以得到东北地区大气降水加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布情况(图4).为使得插值结果更加科学合理,计算中还增添了 CHINP 在该区的4个观测点(海伦、三江、长白山、沈阳)以及周边同时期的12个观测点(GNIP 观测网络中的烟台、石家庄、天津和包头,以及清州、浦项、乌兰巴托、雅库茨克、巴格达林、伊尔库兹克、哈巴罗夫斯克和捷尔涅伊)作为辅助.

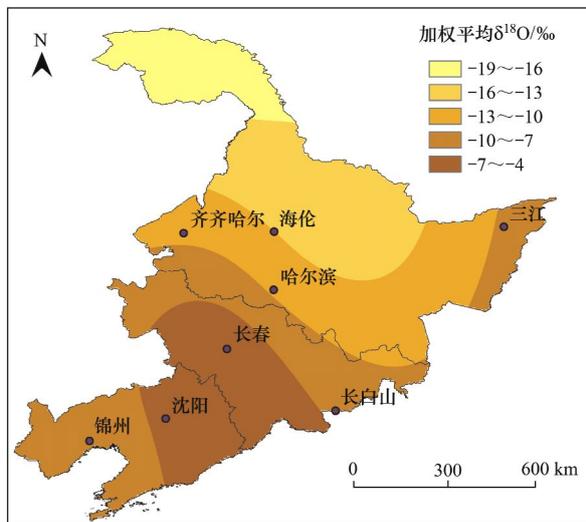


图4 东北地区大气降水中加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布

Fig. 4 Spatial variations of the weighted $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over Northeast China

采用交叉检验的方法对插值效果进行验证,即通过逐一剔除观测站点的数据,利用其它站点数据模拟生成该点的预测值,将其与实测值进行比较,以分析插值的误差情况^[33,34].验证结果表明,预测值与实测值的相关系数为0.5016,可见该方法可以在大尺度上反映出东北地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布特征.

2.3 东北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的环境效应

2.3.1 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关关系

根据 GNIP 观测资料对东北地区大气降水月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度进行回归分析,获得直线方程为: $\delta^{18}\text{O} = 0.37t - 14.79$, t 为温度($^{\circ}\text{C}$),相关系数为0.6306,在0.01的水平上呈正相关,即随着温度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐增大[图5(a)].这一现象符合经典同位素理论:温度效应主要发生在中高纬度大陆内部地区, $\delta^{18}\text{O}$ 受温度影响较大^[35,36].

2.3.2 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的相关关系

研究表明^[6,37],降水量效应往往出现在低纬度沿海地区或海岛,其产生与强对流天气的降水过程紧密联系.这可能与水汽条件相联系,低纬度海洋的水汽来源单一全年均受海洋性气团的影响^[38].东北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均降水量之间不存在简单的线性关系,这可能与纬度较高,降水中的氢氧稳定同位素与降水的关系被温度效应所掩盖有关.

但用二次方程,仍可以对其进行拟合,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均降水量拟合关系为[图5(b)]:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = -0.0005P^2 + 0.141P - 15.47 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.1153)$$

式中, P 为降水量(mm).

2.3.3 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压的相关关系

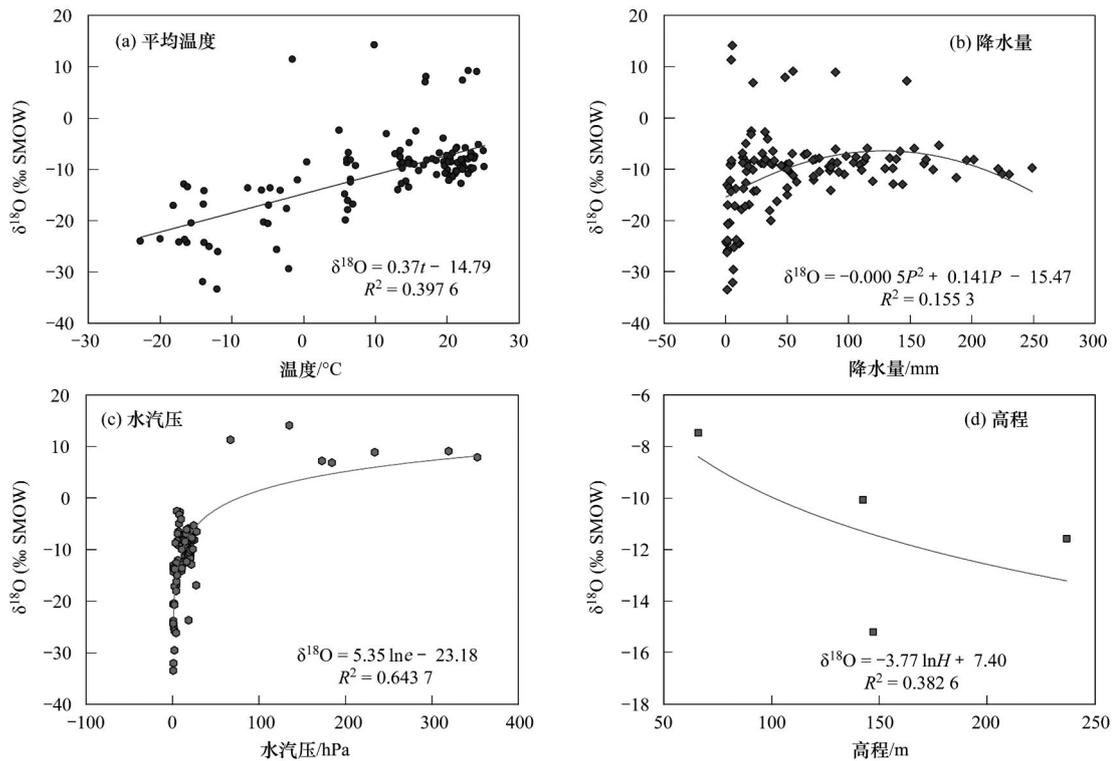
水汽压是反映空气干湿程度的一个指标,研究表明中高纬度 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压的相关性为明显的正相关区^[37].图5(c)表示东北地区 GNIP 观测点大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽压月平均值的相关关系,其对数关系非常显著,表明大气湿度状况对降水中稳定同位素蒸发富集作用的影响,同时也表明不同区域的气候特征对降水氢氧稳定同位素的影响.东北地区冬季温度较低,空气中水汽含量较少,水汽压低,由此大气降水(包括雨、雪)因蒸发而产生的重同位素富集作用很小,使其具有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值;随着夏季温度的升高,空气中水汽含量增加,水汽压亦增大.温度升高的影响以及降落雨滴蒸发产生的重同位素富集均使降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 升高.

2.3.4 $\delta^{18}\text{O}$ 与高程的相关关系

同位素的高程效应是指随海拔高程的不断增加,同位素值呈下降趋势,即同位素值与高程呈负相关关系.依据东北地区 GNIP 观测点大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和高程对其进行拟合,发现随高程的增加, $\delta^{18}\text{O}$ 与高程呈现对数关系[图5(d)]:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = -3.77 \ln H + 7.40 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.3826)$$

图 5 $\delta^{18}\text{O}$ 与月平均温度、降水量、水汽压及高程的相关关系Fig. 5 Correlations between $\delta^{18}\text{O}$ and monthly temperature, precipitation, vapor pressure or altitude

式中, H 为高程(m).

2.3.5 $\delta^{18}\text{O}$ 与各环境因子的多元线性关系

综合考虑东北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与环境因子的影响,将经度、纬度、温度、降水量、水汽压和高程等因子与观测点降水 $\delta^{18}\text{O}$ 进行多元线性回归,得到如下方程:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = -0.144 \text{ Lon} - 1.560 \text{ Lat} + 0.431t - 0.028P + 0.021e + 0.085H + 63.208$$

$$(R^2 = 0.715) \quad (6)$$

式中, Lon 为经度, Lat 为纬度, t 为温度($^{\circ}\text{C}$), P 为降水量(mm), e 为水汽压(hPa), H 为高程(m), 其相关系数为 0.845, 通过了 0.001 的显著性水平验证.

2.4 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的水汽来源

研究表明,大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 不仅与局地气候要素(如温度、降水量等)存在相关关系,同时也与大气水汽输送过程紧密联系^[29,39,40]. 鉴于此,笔者以常规气象上季节作为时间划分依据,即 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 12 月与 1~2 月为冬季. 利用 HYSPLIT 4.9 模型分别计算了 4 个季节每天不同时段(协调世界时 00:00、06:00、12:00 与 18:00)到达观测点的气团轨迹(5 d 回溯), 并对其进行聚类分析. 最后将结果导入 ArcGIS 9.3 软件进一步处理, 得到该区 4 个观测点不同时段 5 d

空气后向轨迹(图 6).

东北地区全年水汽主要有两条路径,即西风带输送的大西洋、北冰洋冷湿水汽和太平洋暖湿水汽,但上述路径在不同的时空条件下具有一定的差别. 冬季、春季和秋季[图 6(a)、6(b)、6(d)]的后向轨迹较为相似:一支由欧洲向东输送,途径俄罗斯、蒙古进入东北地区,属于远源输送;另一支则属于局地源,发源于俄罗斯及蒙古,由内蒙古自治区直接进入东北地区,且其来源比例高于前者. 由于水汽源于高纬度西风带输送的大西洋、北冰洋,沿途通过降水过程使得水汽中的 ^{18}O 不断贫化,再加上这 3 个季节受冬季风的影响,温度较低,蒸发弱,沿途水汽补充较少,使得剩余水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低. 夏季气团轨迹的聚类结果与其它季节差异明显[图 6(c)]. 其中,一支自中亚北部,以西北-东南向经由内蒙古自治区东北部进入我国境内;另一支则发源于太平洋,其所占比例较小;还有一部分来自于局地蒸发的陆源水汽. 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现高值,这是由于夏季大陆内部温度普遍较高,蒸发强,大陆内部湖泊、河流等汇入了大部的局地蒸发水汽,然而同位素正好富集于湖泊、河流. 因此,来自西北部的陆源水汽和局地再蒸发水汽带来的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高;另外,受夏季海洋性季风影响,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值有减小

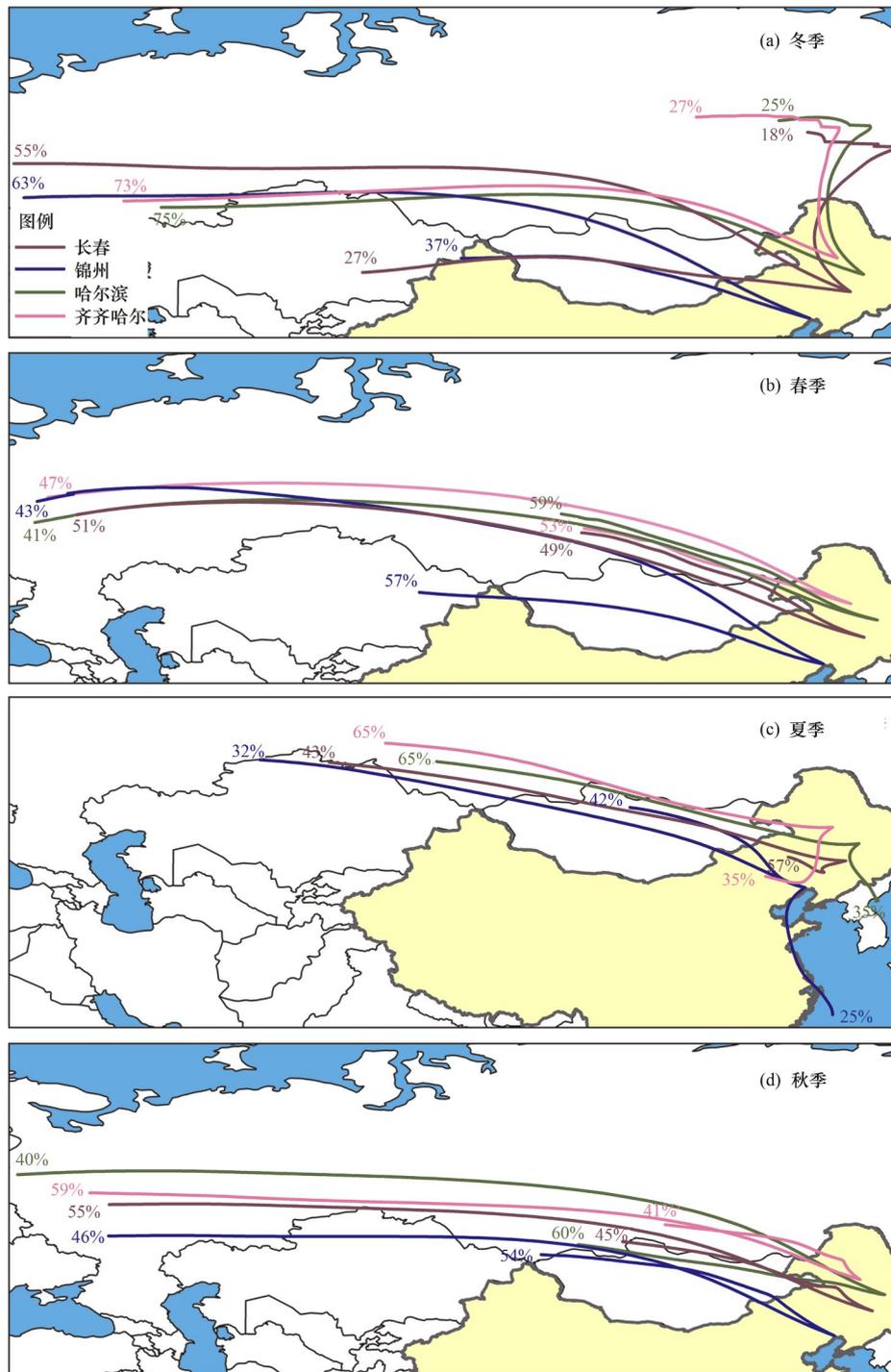


图 6 东北地区观测点不同季节空气后向轨迹示意

Fig. 6 Cluster of backward trajectory from the sampling sites in Northeast China during different seasons

的趋势. 这也进一步表明了来自海洋性气团的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较低, 来自局地蒸发形成的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 较高^[40,41].

3 结论

(1) 对观测点氢氧稳定同位素的分析, 建立了

东北地区局地大气降水线方程 (LMWL) $\delta\text{D} = 7.20\delta^{18}\text{O} - 2.39\text{‰}$, 反映了东北地区独特的局地气候特点. $\delta^{18}\text{O}$ 表现出显著的时空变化特征. 从时间变化上看, $\delta^{18}\text{O}$ 值夏季高、冬季低; 在空间变化上, 则表现为加权平均 $\delta^{18}\text{O}$ 值由南至北呈减小趋势.

(2) 该区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度线性关系显

著,而与水汽压和高程之间存在显著的对数关系;虽然降水量效应不存在,但可以应用二次方程对其进行拟合.综合考虑东北地区大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与环境因子的影响,并对其进行多元线性回归: $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = -0.144\text{Lon} - 1.560\text{Lat} + 0.431t - 0.028P + 0.021e + 0.085H + 63.208$, $r=0.845$,通过了 0.001 的显著性水平验证.

(3) 运用 HYSPLIT 模型对东北地区大气降水水汽来源进行模拟,结果表明该区全年主要有两条水汽来源路径,表现为西风带输送的大西洋、北冰洋冷湿水汽和太平洋暖湿水汽.冬、春、秋季节降水水汽多源于西向及西北向,即西风带输送的大西洋水汽以及极地北冰洋水汽;夏季则不仅受西向及西北向的局地水汽影响,同时还受源自于太平洋的季风带来的水汽影响.

参考文献:

- [1] Friedman I. Deuterium content of natural waters and other substances[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, **4**(1-2): 89-103.
- [2] Dansgaard W. The abundance of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric water and water vapour[J]. *Tellus*, 1953, **5**(4): 461-469.
- [3] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [4] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [5] Araguás-Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D22): 28721-28742.
- [6] 章新平,姚檀栋. 我国降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, **53**(4): 356-363.
- [7] 宋献方,柳鉴容,孙晓敏,等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(7): 738-747.
- [8] 宋献方,于静洁. 国际环境同位素水文学会议纪要及我国的研究对策[J]. *水文地质工程地质*, 2004, **31**(1): 114-115.
- [9] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 中国生态系统研究网络大气降水的稳定同位素特征分析[A]. 见:高丹盈,左其亭. 人水和谐理论与实践——中国水论坛第四届学术研讨会论文集[C]. 北京:中国水利水电出版社,2006. 287-291.
- [10] 章申,于维新,张青莲,等. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. *中国科学 A 辑*, 1973, (4): 430-433.
- [11] Tian L D, Masson-Delmotte V, Stievenard M, et al. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [12] Zhang X P, Masayoshi N, Fujita K, et al. Variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Langtang Valley, Himalayas[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, **44**(9): 769-778.
- [13] Tian L D, Yao T D, Numaguti A, et al. Relation between stable isotope in monsoon precipitation in southern Tibetan Plateau and moisture transport history[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, **44**(S1): 267-274.
- [14] Zhang X P, Masayoshi N, Yao T D, et al. Variations of stable isotopic compositions in precipitation on the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, **32**(6): 481-493.
- [15] Tian L D, Yao T D, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9): 4293-4302.
- [16] Yao T D, Masson V, Jouzel J, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, East Tianshan Mountains, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(23): 3473-3476.
- [17] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 西北地区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源[J]. *地理学报*, 2008, **63**(1): 12-22.
- [18] Yin C L, Yao T D, Tian L D, et al. Temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric water vapor at Delingha[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, **51**(7): 966-975.
- [19] Liu J R, Song X F, Sun X M, et al. Isotopic composition of precipitation over arid Northwestern China and its implications for the water vapor origin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, **19**(2): 164-174.
- [20] 章新平,刘晶淼,中尾正义,等. 我国西南地区降水中过量氘指示水汽来源[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 613-619.
- [21] Zhang X P, Liu J M, Sun W Z, et al. Relations between oxygen stable isotopic ratios in precipitation and relevant meteorological factors in southwest China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(4): 571-581.
- [22] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 我国南部夏季季风降水水汽来源的稳定同位素证据[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(6): 1004-1012.
- [23] Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(2): 200-211.
- [24] 于津生,虞福基,刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. *地球化学*, 1987, (1): 22-26.
- [25] 陈中笑,程军,郭品文,等. 中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J]. *大气科学学报*, 2010, **33**(6): 667-679.
- [26] 张琳,陈宗宇,聂振龙,等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析[J]. *核技术*, 2008, **31**(9): 715-720.
- [27] Liu Z F, Tian L D, Chai X R, et al. A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over China[J]. *Chemical Geology*, 2008, **249**(1-2): 203-212.
- [28] 赵济,陈传康. 中国地理[M]. 北京:高等教育出版社,1999. 395.
- [29] 郑琰明,钟巍,彭晓莹,等. 粤西云浮市大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与水

- 汽来源的关系[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 637-643.
- [30] 章新平, 孙维贞, 刘晶森. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(5): 665-669.
- [31] Gibson J J, Edwards T W D, Birks S J, *et al.* Progress in isotope tracer hydrology in Canada [J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(1): 303-327.
- [32] Welker J M. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$) characteristics of weekly precipitation collected across the USA: an initial analysis with application to water source studies [J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1449-1464.
- [33] 赵传成, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法[J]. 水科学进展, 2011, **22**(3): 315-322.
- [34] 何葵, 傅德平, 赵志敏, 等. 基于 GIS 的新疆降水空间插值方法分析[J]. 水土保持研究, 2008, **15**(6): 35-37.
- [35] Kohn M J, Welker J M. On the temperature correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in modern precipitation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, **231**(1-2): 87-96.
- [36] Yu W S, Yao T D, Tian L D, *et al.* Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2008, **87**(2): 158-169.
- [37] 章新平, 姚檀栋. 全球降水中氧同位素比率的分布特点[J]. 冰川冻土, 1994, **16**(3): 202-210.
- [38] Zhang X P, Shi Y F, Yao T D. Variational features of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ in Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science in China Series B: Chemistry, 1995, **38**(7): 854-864.
- [39] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, **23**(1): 33-41.
- [40] 徐彦伟, 康世昌, 周石研, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源及温度的关系[J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 718-723.
- [41] 杨梅学, 姚檀栋, 田立德, 等. 藏北高原夏季降水的水汽来源分析[J]. 地理科学, 2004, **24**(4): 426-431.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊