

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.026

任玉成, 阮丽, 李欣, 等. 基于粒度方法的大气降尘对浙江省新嵊盆地土壤的物源输入研究. 土壤, 2021, 53(4): 865–873.

基于粒度方法的大气降尘对浙江省新嵊盆地土壤的物源输入研究^①

任玉成¹, 阮丽^{1,3}, 李欣¹, 徐妍¹, 张方方¹, 李建武^{1,2*}

(1 浙江农林大学浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江临安 311300; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3 中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008)

摘要: 为揭示大气降尘对亚热带季风区土壤资源的影响, 本文以亚热带地区典型玄武岩发育土壤为研究对象, 采用土壤地理学和土壤粒度分析方法, 分析表层土壤样品的粒度组成、粒度频率曲线和高含量的“风尘基本粒级”(10~50 μm) 的粒度分布特征, 结果表明大气降尘对土壤表层的影响深远。土壤 Sr-Nd 同位素比值辅助证据也进一步说明表层也不断受到来自大气降尘的影响。研究剖面土壤表层样品的粒度组成、频率曲线、粒度参数和 Sr-Nd 同位素比值均指示显著的风尘特性, 而底土层土壤样品则大多数继承了母岩的特性。揭示了大气降尘对该区域土壤资源的重要补给作用和对土壤发生演变的重要影响。

关键词: 大气降尘; 粒度; 同位素; 玄武岩

中图分类号: P595 **文献标志码:** A

Atmospheric Dust Input to Soils in Xin-sheng Basin, Zhejiang Province Based on Grain Size Analysis

REN Yucheng¹, RUAN Li^{1,3}, LI Xin¹, XU Yan¹, ZHANG Fangfang¹, LI Jianwu^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Ling'an, Zhejiang 311300, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China)

Abstract: In this paper, the typical soil profiles derived from the basalt were selected in the Xin-sheng Basin, Zhejiang Province of subtropical monsoon region of China, and the methods of soil geography and grain size analysis were used to reveal the impact of atmospheric dust on soil by measuring the composition and frequency curve of soil grain sizes and high content of "wind dust basic" (10-50 μm) of topsoil. The results showed that atmospheric dust had far-reaching effect on topsoil, which was also supported by Sr/Nd isotopic ratios of topsoil. The composition, frequency curve and parameters of grain size as well as Sr-Nd isotope ratio all indicated that topsoil had significant characteristics of wind dust, while most bottom soils inherited the characteristics of the parent rock. In conclusion, atmospheric dust has an important effect on the material supply, genesis and evolution of soil in the studied region.

Key words: Atmospheric dust; Grain size; Isotope; Basalt

成土过程是控制地球关键带的生物地球化学循环的重要过程, 并能有效调节岩石圈、水圈、生物圈和大气圈等地球圈层间的相互作用^[1]。经典土壤发生学通常假定“自下而上”的风化渐进模型来开展研究, 即原位风化的土壤剖面是基于母质或母岩自下而上渐进风化成壤发育而成的。这一土壤形成演化模型突出了母质在成土过程中的重要作用。然而, 最新研究

表明, 在受到长期持续大气降尘影响的土壤及景观, 除母质之外的大气降尘也对全球土壤的物质来源有着重要的影响^[2-3], 并已得到众多学者的广泛关注^[4-6]。大气降尘在全球土壤的物质补给和生物地球化学循环中起着重要的作用^[7-11]。因此, 如何有效鉴别大气降尘对土壤的物质添加及理化属性的影响, 对理解土壤的发生演化与大气物源贡献, 都具有重要

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41877006)、浙江省自然科学基金项目(LY21D010002)和浙江省新苗人才计划项目(2020R412048)资助。

* 通讯作者(jameslee@zafu.edu.cn)

作者简介: 任玉成(1995—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源学。E-mail: 1720218786@qq.com

的理论价值和现实意义。

粒度是土壤的基本物理特性之一,并且已经被认为是识别土壤和沉积物起源的一个有效指标^[12]。粒度分布已经被广泛地运用于认识沙丘的形态与动力形成过程、揭露矿物质组分、区分沉积环境、提供环境信息和揭露运输动力^[12-14]。在中国北方黄土高原的双峰粒度分布说明了风尘沉积粗和细的两个组分,并且它也通过拟合粒度分布函数进行数值上划分。对于风尘的粒度分析反映了在中国北方一年中的风尘季节低空环流的增强^[15-16]。此外,粒度参数,例如粒度中位数/平均数和粒度比率,也被广泛运用于冬季风历史的重建。

浙江省地处我国东南部地区,既有海洋源盐分的影响,又可能具有北方沙尘的影响,大气干沉降和湿沉降对该地区的土壤-植物生态系统和近地表环境有着重要的影响。新嵊盆地是我国东南沿海玄武岩发育地区之一,广泛分布多期喷发的以玄武岩为主的火山岩。该地区相近的成土环境,第三纪末到更新世晚期多期喷发的玄武岩发育土壤,在中新世时期,浙江省东部在拉张作用下,沿着深大断裂,玄武质岩浆上涌,并随着小规模地喷发形成了溢流相玄武岩,随后进入火山活动间歇期,至更新世晚期,熔浆沿上述断裂的不同火口源相继涌出地表,期间共经历 5 次溢流式喷发,形成了简单岩流单元玄武岩,表层玄武岩经强烈风化后,多数发育为暗红色风化壳和红黏土^[17-18],构成了良好的土壤时间序列,为我们研究土壤时间序列的演化特征与大气物源贡献提供了良好的载体。因此,本文选取浙江省新嵊盆地典型玄武岩发育的土壤为研究对象,通过土壤粒度组成、粒度分布曲线和粒度参数及锶钕(Sr、Nd)同位素辅助证据分析,揭示该地区土壤的发生学特征和大气物源对土壤的影响,为系统理解我国亚热带地区土壤的发生和演变及土壤资源保护提供更全面的认识。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于我国东部的浙江省新嵊盆地(图 1),该区域属于亚热带季风区的北界,年平均降水量约 1 500 mm,近七成集中在雨季(4—9月)。年平均温度和相对湿度分别是 16.6 °C 和 53.2%,最低温出现在 1 月,约为 -5.3 °C,最高温则在 8 月,约为 40.3 °C。研究区主要河流是漕河,下伏母岩是玄武岩,植被类型主要包括楠木、青冈、苦槠和山茶等常绿阔叶林。本研究选取浙江省新嵊盆地的回山镇(HS)、双彩乡(SC)和三界镇(SJ)3 个玄武岩原位风化土壤剖面作为研究对象(图 1)。其中采样点均位于红色丘陵岗地的平台区中央位置,以减少土壤侵蚀、堆积作用及地下水对土壤物源研究的干扰。根据中国土壤系统分类(CST)^[19],研究剖面土壤类型为普通铁质湿润锥形土(表 1)。土壤向下挖至少 1 m 深,或者到

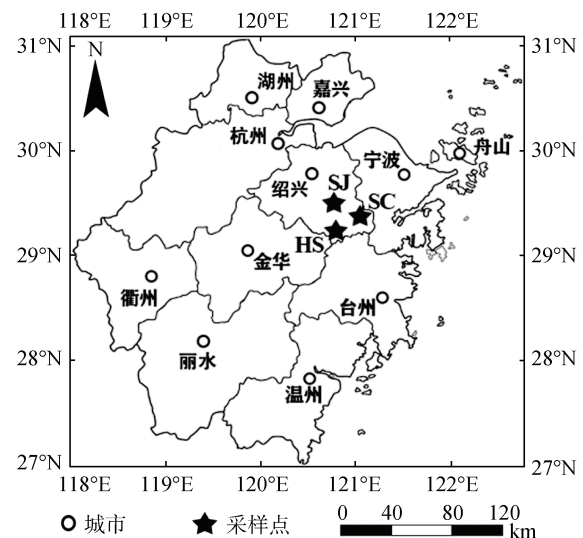


图 1 新嵊盆地土壤采样位置图
Fig. 1 Sampling sites in Xin-Sheng Basin

表 1 新嵊盆地土壤剖面描述与基础理化性质

Table 1 Description and basic physicochemical properties of studied soil profiles in Xin-Sheng Basin

剖面	地理位置	土壤类型	土壤发生层	深度(cm)	pH	LOI (wt)(%)	CEC(cmol/kg)	有机质(g/kg)
HS	新昌县回山镇	普通铁质湿润锥形土	A	0~70	5.4	22	7.5	27.1
			Bw	71~160	5.4	17	8.3	7.4
			C	161~210	5.6	5	9.0	3.6
SC	新昌县双彩乡	普通铁质湿润锥形土	A	0~10	6.4	25	7.0	50.3
			Bw	11~20	6.2	19	7.5	20.2
			C	21~55	6.6	6	6.6	7.7
SJ	嵊州市三界镇	普通铁质湿润锥形土	A	0~10	6.5	28	6.7	32.8
			Bw	11~30	6.3	21	7.1	8.1
			C	31~80	6.7	7	7.4	5.8

基岩的深度,并按照发生层从C层向A层依次取样。土壤剖面半风化层出现大量玄武岩球状风化体,并在B层出现中量的铁锰结核和棱柱状裂隙。土壤剖面自下而上,颜色均由7.5YR4/6逐渐向7.5YR3/4过渡,土壤结构由块状逐渐变化为团粒结构,根系则由少量逐渐变为表土层的大量根系。

1.2 实验分析

土壤样品自然风干后,挑出枯枝落叶、根系、高于2 mm非土壤物质,四等分法取土,先后过10目、60目、100目、200目的尼龙筛,装好备用。土壤常规理化性质如土壤有机质、LOI(烧失量)、CEC、pH等都按常规分析方法测定^[20],其中土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸硝化法测定,土壤烧失量采用马弗炉称重法测定,pH(土水比1:2.5, *m*:*V*)采用电位法测定。过10目的土壤样品(<2 mm)进行粒度组成测定,具体方法如下:①首先用30%的H₂O₂溶液去除有机物质;②随后用过量的1:100(*m*:*V*)草酸来提取杂质,③用六偏磷酸钠溶液分散过夜,之后超声震荡处理20 min,土壤样品的粒度用激光粒度分析仪(LS13320)来测量^[12,21],测量范围在0.02~2 000 μm。土壤样品风干并碾磨过200目后用于Sr-Nd同位素分析。通过样品的分解、分离过程后,采用高分辨率热电质谱仪(TIMMS)进行样品Sr-Nd同位素测定,具体方法详见文献[21]。

1.3 数据计算与分析

根据Folk和Ward公式^[22]计算粒度参数,具体计算公式如下: $M\phi=(\Phi16+\Phi50+\Phi84)/3$; $\sigma=(\Phi84-\Phi16)/4+(\Phi95-\Phi5)/6.6$; $SK\phi=(\Phi84+\Phi16-2\Phi50)/2(\Phi84-\Phi16)+(\Phi95+\Phi5-2\Phi50)/2(\Phi95-\Phi5)$; $Kg=(\Phi95-\Phi5)/2.24(\Phi75-\Phi25)$ 。其中Φ5、Φ16、Φ25、Φ50、Φ75、Φ84、Φ95分别代表累计曲线上百分含量为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95% 7处的粒径(Φ值)。 $\epsilon_{Nd}=(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{Measured}})/(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}})-1) \times 10^4$,是现今标准化的同位素组成部分,其中CHUR值为0.512 638。

主要采用SPSS、Excel、Origin等分析软件进行相关分析、统计分析和数据处理、作图等。

2 结果与分析

2.1 土壤基础理化性状

新嵊盆地玄武岩发育土壤的基础理化性状见表1。土壤样品的pH范围在5.4~6.7,大部分土壤样品呈弱酸性。其中最大值出现在SJ剖面底土层样品,最小值为HS剖面表层样品。HS、SC和SJ3个剖面

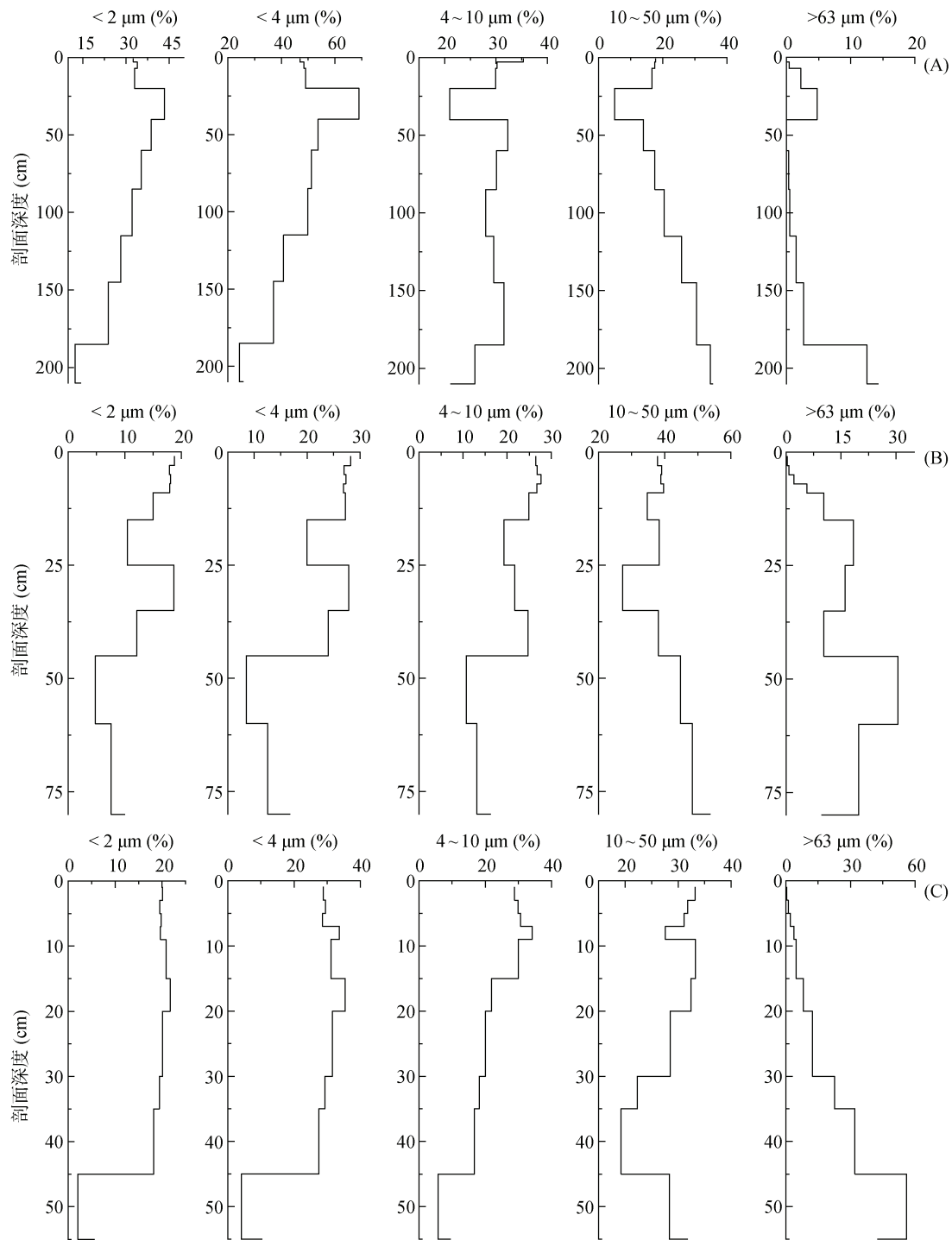
土壤的烧失量(LOI)分别为5~22、6~25和7~28,烧失量(LOI)随着深度的增加而逐渐降低。土壤样品的CEC值范围为6.6~9.0,土壤有机质含量的剖面分布特征符合一般的规律,其含量随着深度的增加而逐渐降低,有机质在表层呈富集趋势。因此,各个研究剖面土壤样品的基础理化性状均呈渐变过渡趋势,没有出现明显的异常。

另外,研究剖面整个土体的形态特征都比较均一,剖面内部土体上下层颜色没有出现明显的差异,呈渐变过渡趋势;剖面自上而下,土体结构由表层的团粒状向底土层的块状逐渐演变;土壤剖面中根系含量自上而下逐渐减少,由表层的大量中细根向底土层的少量细根转变;土壤紧实度由表层向底土层呈现逐渐加强的趋势,逐渐由松散向稍紧、紧实甚至坚实转变;所有剖面中也没有发现异源堆积特征。这些特征都指示各研究剖面内部均一、渐变、连续的发生学特性,为后续更好地理解 and 开展土壤发生研究提供了良好的前提条件。

2.2 新嵊盆地土壤的粒度分布

粒度粗细的时空变化有助于揭示土壤的物质来源、源区距离的变化、成土环境的变化和成土风化程度的时空差异^[23-24]。因此,粒度组分分析在古气候、古环境和土壤地理学研究方面有重要意义。新嵊盆地玄武岩发育土壤样品的粒度组成结果表明,HS、SC和SJ3个土壤剖面样品的粒度组成具有较好的相似特征,即表层(0~30 cm)土壤样品的10~50 μm含量显著升高,高含量的“风尘基本粒级”(10~50 μm)的粒度分布特征,指示大气降尘对土壤表层的影响深远。HS、SC和SJ3个土壤剖面样品的粒度组成也具有较好的相似性(图2)。具体表现在:①土壤剖面样品的黏粒含量都较低而砂粒含量较高;<2 μm粒级均值都低于15%;②<2 μm、<4 μm和4~10 μm的粒度分布,随着深度加大,呈现下降趋势,而<63 μm粒级随着深度加大,呈现上升趋势;③10~50 μm粒级含量自下而上均呈现先减少后增加趋势。尤其是在表层(如A层),10~50 μm含量出现明显的急剧升高现象,这可能与表层的外源物质输入有关^[25]。

粒度频率曲线对于指示土壤物源具有重要作用^[13-14,25],研究剖面土壤粒度频率曲线也说明了大气降尘对土壤物质有显著影响(图3)。土壤粒度频率曲线显示HS、SC和SJ3个剖面底土层(40 cm以下)表现为单峰分布模型,具有较高的粗颗粒组分(图3D~3F)。频率曲线最大众数粒径在5.61~133.75 μm之间,并且峰值都低于4%。另一方面,HS、SC和SJ土壤剖面



(A、B 和 C 分别代表在 HS、SC 和 SJ 3 个剖面土壤的样品)

图 2 新嵯盆地土壤的粒度组成随剖面深度变化

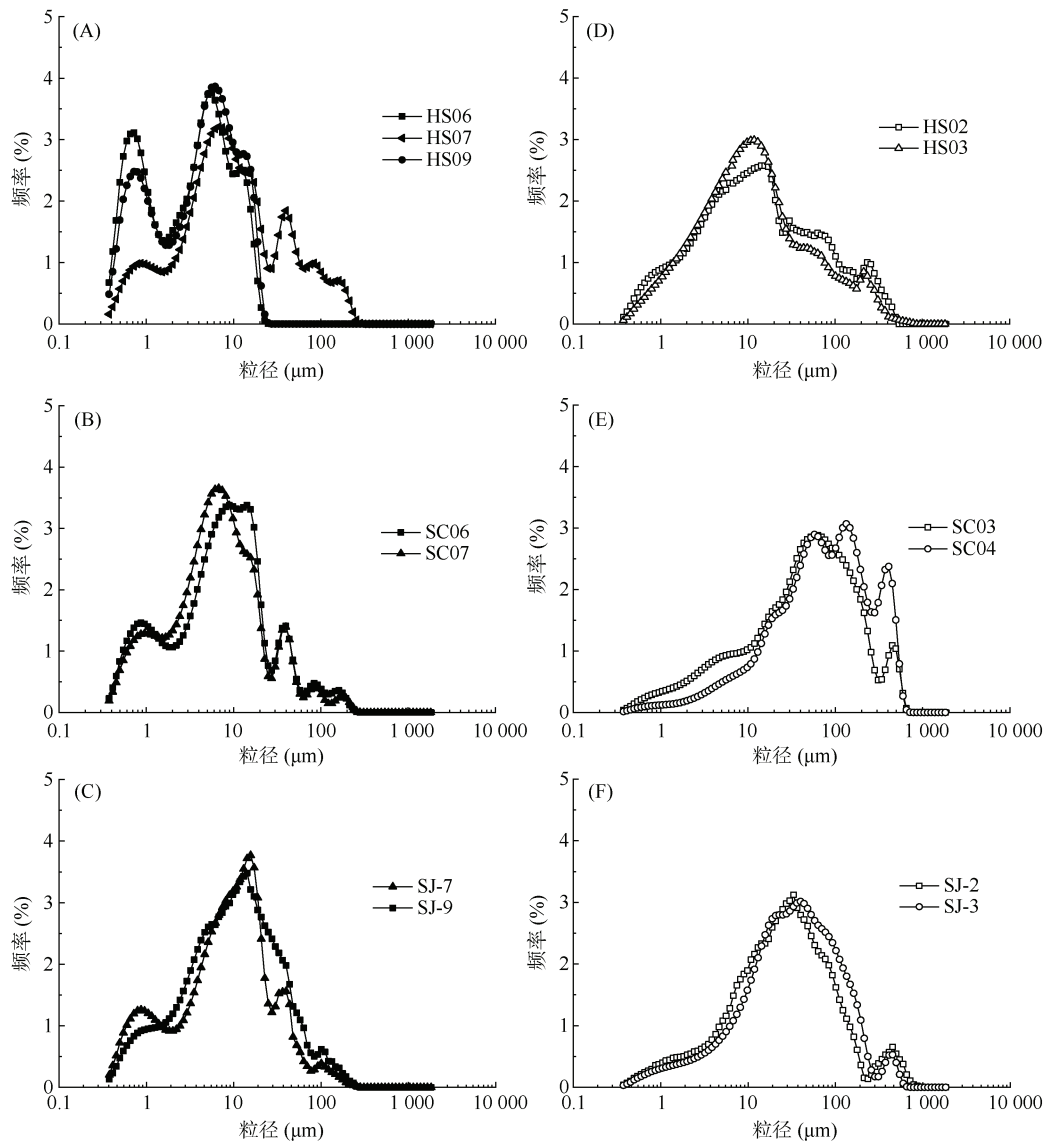
Fig. 2 Vertical distributions of soil grain sizes in Xin-Sheng Basin

表层样品(A层)的粒度频率曲线与底土层样品具有显著不同,具体表现为:①表层样品的粒度频率曲线呈现显著的双峰分布模型($1\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 附近);②表层样品的细颗粒组明显高于底土层样品,即在 $0.5\sim 4\ \mu\text{m}$ 处显示有较高含量的细颗粒组分(图 3A~3C);③表层样品的粗颗粒组分非常低,大于 $200\ \mu\text{m}$ 组分含

量接近 0。

2.3 新嵯盆地土壤的粒度参数

土壤的粒度参数对于指示土壤物源也有重要作用^[14]。粒度参数,包括均值($M\phi$)、分选系数(σ)、偏度($SK\phi$)、峰度(Kg)。研究结果显示(表 2):①粒度平均粒径值($M\phi$)越高,指示颗粒组成越细。表层土壤



(A、B 和 C 分别代表 HS、SC 和 SJ 剖面表层(0~30 cm)土壤样品；D、E 和 F 分别代表这三个剖面的底土层(C 层)土壤样品)

图 3 新嵊盆地土壤的频率曲线

Fig. 3 Frequency curves of soil grain sizes in Xin-Sheng Basin

表 2 新嵊盆地土壤剖面的粒度参数

Table 2 Parameters of grain size of studied soil profiles in Xin-Sheng Basin

剖面	土壤发生层	样品数目	粒度参数			
			平均粒径(Mφ)	分选系数(σ)	偏态(SKφ)	峰态(Kg)
HS	A	6	8.05	1.65	0.04	1.29
	Bw	5	6.98	1.94	0.59	1.25
	C	3	6.37	2.07	0.55	1.21
SC	A	5	7.02	1.77	-0.04	1.28
	Bw	6	5.51	2.06	0.78	1.38
	C	4	4.91	2.07	0.89	0.89
SJ	A	7	7.33	1.73	0.16	1.26
	Bw	5	6.17	2.01	0.53	1.24
	C	4	5.41	1.97	0.71	2.00

注：粒度参数值为每个土壤发生层的平均值，平均粒径单位为 φ。

样品(0 ~ 40 cm)的平均粒径值($M\phi$)较高(A 层均值可达 8.05ϕ), 而底土层样品的平均粒径值($M\phi$)较低, 在 HS、SC 和 SJ 3 个剖面 C 层均值分别为 6.37ϕ 、 4.91ϕ 和 5.41ϕ ; ②偏度($SK\phi$) 在 HS、SC 和 SJ 3 个剖面表层低于底土层, A 层均值范围在 $-0.04 \sim 0.16$, 呈现了正态分布和正偏度; 底土层偏度($SK\phi$) 均值范围在

$0.55 \sim 0.89$; ③HS、SC 和 SJ 土壤剖面的峰度(Kg) 值都低于 1.40, 其中底土层土壤样品的峰度(Kg) 值略高于表土层, C 层均值分别可达 1.21、1.38 和 1.28; ④分选系数(σ) 越小, 指示分选性越好。在 HS、SC 和 SJ 3 个剖面表层分选系数(σ) 值明显比底土层小, 表明表层土壤存在一定分选性(图 4)。

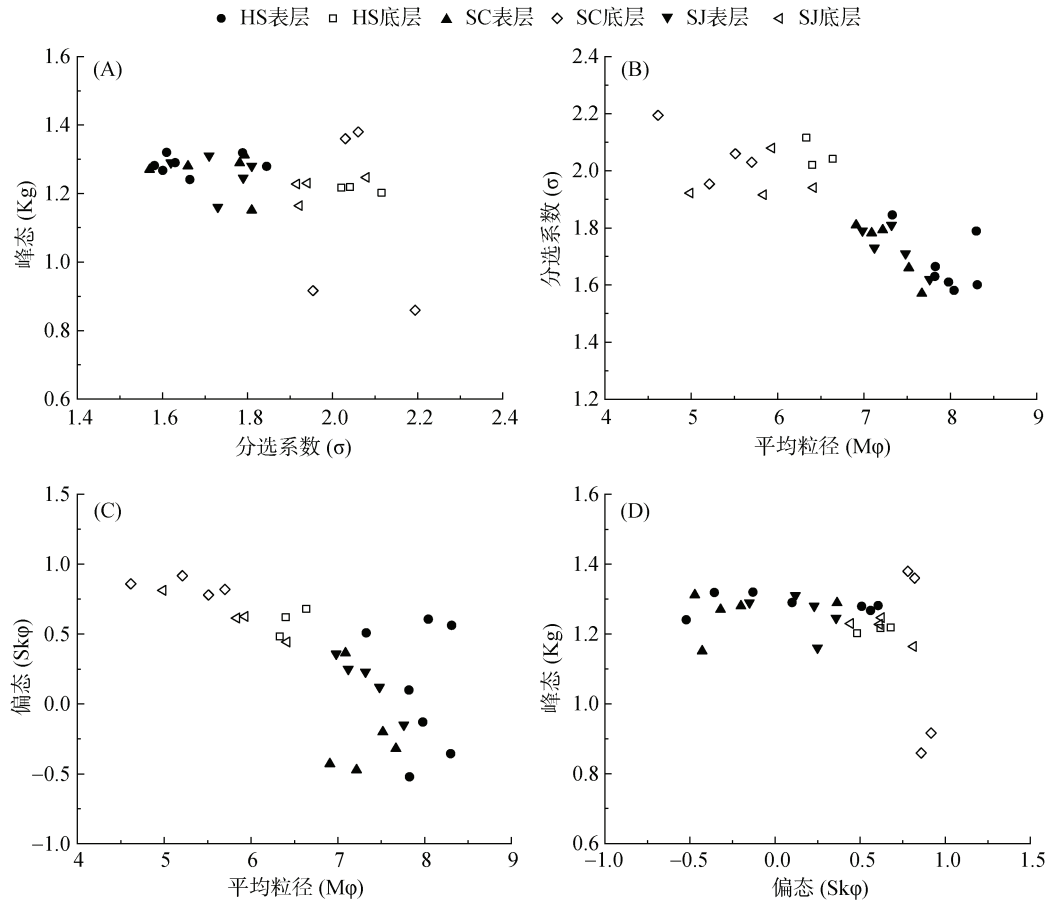


图 4 新嵯盆地土壤粒度参数散点图

Fig. 4 Scatter graphs of parameters of soil grain size in Xin-Sheng Basin

另外, Sr 和 Nd 同位素分析结果表明, 研究剖面土壤表层样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.711 3, 底土层样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.704 5。同时, 研究剖面近表层土壤样品的 ϵNd 值介于 $-6.1 \sim -1.2$, 均为负值, 而底土层样品的 ϵNd 值介于 $1.1 \sim 2.5$ 。

3 讨论

3.1 母质对成土过程的影响

母质是土壤物质的重要来源, 也是土壤形成的一个关键因素^[26-27]。本研究中的土壤剖面是玄武岩残积风化物原位发育而来, 因而无论是土壤的物质来源还是土壤的各项属性, 必然都深深地受到来自母质要素的重要影响。即表现出显著的母质原位风化的渐变特

征和土壤对母质的继承性特征。土壤剖面自下而上, 从母质层(C)到淀积层(B)土壤的粒度组成均表现出较好的渐变趋势(图 2)。从粒度组成来看, 除表层(0 ~ 30 cm)土壤样品可能受到大气沉降和末次冰期风尘沉积的影响外, 其他层位土壤的细颗粒组成, 包括 $<2 \mu\text{m}$ 、 $<4 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒级含量, 均表现出沿剖面自下而上明显的逐渐增加趋势; 而粗颗粒组分($>63 \mu\text{m}$) 则表现为沿剖面自下而上逐渐减少的趋势(图 2)。因此, 土壤剖面自下而上显著的粒度组成渐变特征, 揭示了土壤的粒度属性受到了来自母质的显著影响。

从粒度频率曲线来看, 在供试土壤剖面底土层的频率曲线具有较好的相似性(图 3D~3F), 其可能的原

因是三者具有相同的母质,即玄武岩残积风化物。具体表现为:①底土层样品的粒度频率曲线呈现显著的单峰分布模型;②底土层样品的细颗粒组分明显较低,而粗颗粒组分较高(图 3D~3F),这些特征均与土壤属于玄武岩残积母质发育而来有关。

另外,从新嵊盆地土壤样品的粒度参数来看,包括均值($M\phi$)、分选系数(σ)、偏度($SK\phi$)和峰度(Kg),土壤剖面从底土层到表层,也呈现出较好的渐变趋势(图 4)。因此,土壤剖面形态特征、粒度分布和粒度参数,均说明研究区域土壤受到母质的重要影响,并对母质的相关属性具有一定继承性。

3.2 大气降尘对成土物质的影响

除了母质,大气降尘是土壤和沉积物的另一个重要来源,并且对土壤有重要影响。研究表明,作为世界沙尘中心之一的我国西北沙漠和黄土高原,其产生的亚洲降尘可以持续不断地进入土壤,并可能对我国的土壤资源产生深远影响^[21, 28]。新嵊盆地坐落中国东南部,北方的冬季风能延伸到这个区域,并且亚洲降尘被认为是一个潜在的重要土壤来源。季风将大量沙尘向东运移到东部和东南地区,亚洲降尘不仅可以影响到中国北方的广大地区,还影响韩国、日本、南海海域和欧洲及广阔的太平洋^[28-29]。据 IPCC^[30]估计每年全球产生的气溶胶为 3 442 Tg,平均沉降到 $5.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的地球表面上,计有 $6.75 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的物质进入地表系统。目前在美国夏威夷岛的研究已经表明了亚洲源降尘对其土壤深刻的影响。Chadwick 等^[3]在美国夏威夷高度风化玄武岩发育的土壤上研究指出,400 万年以来来自东亚的大气降尘是维系海岛生态系统的重要养分来源。Li 等^[21]研究表明,即使在远离我国大陆的海南岛土壤仍然受到来自亚洲降尘的物源输入。另外,前人研究表明^[31-33],新嵊盆地末次间冰期以来土壤的粒度测定和地质记录分析表明:该区域共经历了末次间冰期夏季风为主时期、末次冰期冬季风为主时期和全新世夏季风为主的不稳定时期的 3 个演变时期。末次间冰期时,以夏季风为主,气候呈现温湿特点,受夏季风影响较强,成壤速率大于风尘沉积速率,土壤粒度偏细,间冰期早期较晚期,夏季风较强,土壤粒度较晚期偏细。到末次冰期时,由夏季风为主转化为以冬季风为主,受冬季风影响较强,气候变得极其干冷,土壤发育缓慢,代之以风尘沉积为主,大量风尘物资随着冬季风搬运沉积到长江流域,风尘沉积速率大于成壤速率,土壤粒度偏粗。随后过渡到全新世时期,逐渐转化为以温湿气候为特点的夏季风为主的不稳定时期。早期全新世夏季风逐

渐强化阶段,中期全新世夏季风鼎盛阶段,晚期全新世夏季风衰弱阶段,土壤粒度呈现了由细变粗的变化趋势。晚更新末期,尤其在末次冰期鼎盛时期,古东季风活动强烈,不仅在中国西北地区形成广阔的沙漠和黄土地貌,还源源不断地南下,从晚更新世晚期中国东部古环境特点分析,中国南部当时处于气候干冷、植被稀少的草原环境。同时,当时中国南部地形起伏不大,使古东季风由西至东部移动无地形阻隔,因而在干冷气候条件下风所携带的风尘物质普遍沉降在中国南方,在南方多地形成风成沙丘-风尘堆积地貌景观。但是在新嵊盆地地形地貌易形成“夹管效应”,强化古东季风风力作用,风尘堆积和风蚀作用明显^[34-35]。

前人研究表明^[1, 36], $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 粒级即风尘基本粒级,是指示风尘沉积的重要粒级。研究剖面土壤样品的粒度组成具有较好的相似特征,即表层土壤样品的 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 含量显著升高,尤其在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 层风尘基本粒级增加幅度最为明显(图 2),揭示了大气降尘对土壤表层的物质输入。土壤粒度频率曲线的模式也能有效指示土壤物质来源^[37-38]。土壤表层($0 \sim 40 \text{ cm}$)土壤样品的粒度频率曲线模式明显不同于底土层(图 3)。表层土壤细粒组分含量明显高于底土层,并呈现双峰结构(图 3A~3C),即除主峰外在细颗粒部分也出现了明显的峰值;而底土层则细颗粒含量很低而粗颗粒含量较高($>300 \mu\text{m}$),并呈现单峰结构(图 3D~3F)。通过 3 个剖面粒度分析结果对比分析,可知,HS、SC 和 SJ 3 个剖面土壤表层样品的粒度频率曲线与前人^[36-42]关于下蜀黄土和黄土高原样品具有极好的相似性,研究剖面土壤表层样品与下蜀黄土不仅具有极为相似的颗粒组成,而且存在着自西而东稍有变细的分布趋势^[32, 35],指示它们有共同物源。因此,粒度组成和频率曲线表明,亚洲降尘可能对新嵊盆地土壤有物质输入。

粒度参数散点图已经被广泛用于区分沉积物的源头和沉积环境。由图 4 可知,新嵊盆地土壤的粒度参数散点图可分为两个投影区。第一个投影区集中在土壤剖面底土层样品(图 4,空心点部分),表现为分选很差,峰度值和平均粒径较低特征。反之,另外一个投影区集中在表层样品,分选系数较低($\sigma < 1.83$),指示土壤样品分选较好(图 4A);平均粒径显著高于底土层样品($M\phi > 6.8\phi$),表明表土层具有较多的细颗粒组分;偏度($SK\phi$)值呈现正态分布和正偏度;峰度值则略高于底土层并表现出较为集中特征(图 4,实心点部分)。另外,新嵊盆地表层土壤的粒度参数散

点分区特征与中国黄土高原黄土十分吻合,进一步揭示了它们可能具有相同的物源^[43-45]。因此,HS、SC和SJ土壤剖面表层和底土层样品的粒度参数散点投影分区也为大气降尘和母质物源鉴别提供了有效证据。

另外,在大气降尘物质添加的影响下,对土壤形成和性状主要有以下潜在影响:①大气降尘输入可以改变土壤的物理性质,导致表层土壤粒度组成中细颗粒含量增高,尤其引起表层土壤粒度组成中10~50 μm 粒级即风尘基本粒级异常增高。由于玄武岩原位风化母质粗颗粒较多,而大气降尘的物质添加带来了大量较细颗粒,从而使土壤细颗粒显著增高。也有研究表明大气降尘输入甚至影响到土壤水盐的运移^[46];②大气降尘能够改变土壤的化学性质,给土壤带来养分和盐分,是生态系统的重要养分来源^[47-48],也可能带来酸化和富营养化的潜在风险^[49-52]。大气降尘也可以改变土壤的同位素组成,从而也可以作为鉴别土壤中大气沉降输入的重要证据^[21]。

3.3 其他辅助证据(Sr和Nd同位素)

Sr和Nd的同位素已被证明是理解土壤发生演化、元素生物地球化学循环和土壤物源示踪的有效指标^[53-55]。本研究中大气降尘、土壤和母岩都具有显著差异的Sr和Nd同位素端元值^[21],因而利用Sr和Nd同位素指标可为研究区土壤的大气沉降物源输入提供有效的辅助证据。研究剖面土壤表层样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值(0.711 3)显著高于母岩(0.703 8),而非非常接近风尘⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.724 6^[3],表明大气降尘对表层土壤具有物源输入。而底土层样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值(0.704 5)则接近玄武岩母岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,反映了底层土壤主要继承母岩的物质来源而受大气降尘影响较小。同样HS、SC和SJ 3个剖面近表层土壤样品的εNd均为负值,接近大气降尘εNd值(-10.44)^[21];而底土层样品的εNd值则均为正值,即接近母岩值(+2.6),揭示其受母岩物源的影响较大。因此,土壤样品的Sr和Nd同位素指标与土壤粒度组成、粒度参数证据均表现出较好的一致性,即验证了研究剖面图表层受到显著的大气降尘影响和物源输入^[56-57]。

4 结论

新嵯盆地玄武岩上发育土壤的粒度组成、频率曲线、粒度参数和Sr-Nd同位素比值,均表明大气降尘对土壤的表层物质添加作用。研究区底土层土壤样品大多数继承了母质的特性,受玄武岩残积风化母质

的影响较大;与底土层土壤显著不同,表层土壤则具有明显的风尘特性。因此,研究土壤剖面同时受到母质和大气降尘的双重影响,揭示了大气降尘及末次冰期风尘沉积对土壤发生演变的重要影响和物源输入,为区域土壤的发生演化和土壤资源合理利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 胡雪峰, 龚子同. 江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 1-9.
- [2] Erel Y, Torrent J. Contribution of Saharan dust to Mediterranean soils assessed by sequential extraction and Pb and Sr isotopes[J]. Chemical Geology, 2010, 275(1/2): 19-25.
- [3] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, et al. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development[J]. Nature, 1999, 397(6719): 491-497.
- [4] Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A. Accretion of Asian dust to Hawaiian soils: Isotopic, elemental, and mineral mass balances[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(12): 1971-1983.
- [5] Pett-Ridge J C, Derry L A, Kurtz A C. Sr isotopes as a tracer of weathering processes and dust inputs in a tropical granitoid watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(1): 25-43.
- [6] Gross A, Palchan D, Krom M D, et al. Elemental and isotopic composition of surface soils from key Saharan dust sources[J]. Chemical Geology, 2016, 442: 54-61.
- [7] Nakano T, Yokoo Y, Nishikawa M, et al. Regional Sr-Nd isotopic ratios of soil minerals in Northern China as Asian dust fingerprints[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(19): 3061-3067.
- [8] Li J W, Zhang G L, Gong Z T. Nd isotope evidence for dust accretion to a soil chronosequence in Hainan Island[J]. CATENA, 2013, 101: 24-30.
- [9] Lin Y C, Feng J L. Aeolian dust contribution to the formation of alpine soils at Amdo (Northern Tibetan Plateau)[J]. Geoderma, 2015, 259/260: 104-115.
- [10] Han X F, Lu X W, Zhang Q H, et al. Grain-size distribution and contamination characteristics of heavy metal in street dust of Baotou, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 468.
- [11] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(2): 159.
- [12] 王兆夺. 黄河中游—淮河上游全新世黄土土壤粒度与物源关系分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [13] 年秀清, 韩凤清, 韩继龙, 等. 罗马尼亚 Mircea Voda 剖面黄土粒度特征及其成因指示[J]. 盐湖研究, 2018, 26(3): 20-25.
- [14] 乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 中新世黄土-古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(7): 646-653.

- [15] 江艳平. 粒度分析资料在沉积环境研究中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2015(11): 102-103.
- [16] 李学林, 李福春, 陈国岩, 等. 用沉降法和激光法测定土壤粒度的对比研究[J]. 土壤, 2011, 43(1): 130-134.
- [17] 朱红雷. 浙江省第三系玄武岩的工程地质特点及其对策[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(S1): 70-75.
- [18] 褚平利, 邢光福, 洪文涛, 等. 陆相火山岩区填图方法的实践——以浙江嵊州新生代玄武岩为例[J]. 地质通报, 2017, 36(11): 2036-2044.
- [19] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 土壤实验室分析项目及方法规范[M]. 南京: 东南大学出版社, 1991.
- [21] Li J W, Zhang G L, Ruan L, et al. Sr-Nd elements and isotopes as tracers of dust input in a tropical soil chronosequence[J]. Geoderma, 2016, 262: 227-234.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [23] 阿斯耶姆·图尔迪, 李新国, 靳万贵, 等. 开都河流域下游绿洲土壤粒度特征分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1343-1350.
- [24] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803-812.
- [25] 张玉兰. 东北典型黑土区耕作土壤粒度特征及其环境指示意义[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [26] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 150-154.
- [27] 杨用钊, 李福春, 曹志洪, 等. 昆山绰墩古土壤粒度特征及母质判别[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 1-5.
- [28] Feng J L, Hu Z G, Ju J T, et al. The dust provenance and transport mechanism for the Chengdu Clay in the Sichuan Basin, China[J]. CATENA, 2014, 121: 68-80.
- [29] Lequy É, Conil S, Turpault M P. Impacts of Aeolian dust deposition on European forest sustainability: A review[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 267: 240-252.
- [30] IPCC. Climate change 1995. The science of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [31] 蔡方平, 胡雪峰, 杜艳, 等. 安徽郎溪黄棕色土-红土二元结构土壤剖面的成因与长江流域第四纪晚期古气候演变[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 220-229.
- [32] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 末次冰期鄱阳湖西南缘地区的风尘堆积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 101-108.
- [33] 董光荣, 王贵勇, 李孝泽, 等. 末次间冰期以来我国东部沙区的古季风变迁[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 1996, 26(5): 437-444.
- [34] 张慧, 潘保田, 徐树建, 等. 末次间冰期以来渭河上游气候演化的黄土记录研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 182-186.
- [35] 郑祥民, 严钦尚. 末次冰期苏北平原和东台海区的风尘黄土沉积[J]. 第四纪研究, 1995, 15(3): 258-266.
- [36] 孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 327-335.
- [37] 孙东怀, 鹿化煜. 晚新生代黄土高原风尘序列的粒度和沉积速率与中国北方大气环流演变[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 251-262.
- [38] 侯吉立, 刘秀铭, 马明明, 等. 西宁盆地晚始新世泥岩地层粒度特征及其古环境指示意义[J]. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(1): 1-12.
- [39] 陈骏, 汪永进, 陈咏, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259-266.
- [40] 伊继雪. 第四纪加积型红土与下蜀黄土理化特征对比及环境意义[D]. 金华: 浙江师范大学, 2010.
- [41] 王海力. 中亚热带第四纪风成沉积物地球化学特征[D]. 金华: 浙江师范大学, 2012.
- [42] 封珍. 南方下蜀黄土的矿物组成及其对物源指示意义研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [43] 胡雪峰, 鹿化煜. 黄土高原古土壤成土过程的特异性及发生学意义[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 669-675.
- [44] Hu X F, Jiang W, Ye W, et al. Yellow-brown earth on Quaternary red clay in Langxi County, Anhui Province in subtropical China: Evidence for paleoclimatic change in late Quaternary period[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 542-551.
- [45] Xiong S F, Sun D H, Ding Z L. Aeolian origin of the red earth in southeast China[J]. Journal of Quaternary Science, 2002, 17(2): 181-191.
- [46] 孙艳伟, 李生宇, 徐新文, 等. 大气降尘沉积对塔克拉玛干沙漠腹地土壤水盐运移的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1905-1911.
- [47] Likens G E, Driscoll C T, Buso D C. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem[J]. Science, 1996, 272(5259): 244-246.
- [48] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest[J]. Science, 1989, 244(4906): 776-783.
- [49] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1048-1059.
- [50] 袁宇志, 郭颖, 张育灿, 等. 亚热带典型小流域景观格局对耕地土壤酸化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 90-99.
- [51] 周玲红, 黄晶, 王伯仁, 等. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 457-467.
- [52] 王佳, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城区空气降尘中重金属的特点及其在表层土壤中的累积量研究[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1160-1167.
- [53] Borg L E, Banner J L. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4193-4206.
- [54] Zeng F M, Liang M Y, Peng S Z, et al. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Neogene eolian deposits in the Xining basin and implications for their dust sources[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(5): 669-676.
- [55] Zhao W C, Balsam W, Williams E, et al. Sr-Nd-Hf isotopic fingerprinting of transatlantic dust derived from North Africa[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 486: 23-31.
- [56] 薛迪, 陈春强, 黄蕾, 等. 含氮气体在海盐表面的非均相反应对中国近海大气氮干沉降的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 19-30.
- [57] 陈焕焕, 王云涛, 齐义泉, 等. 北太平洋大气沉降的时空特征及其对副极区海洋生态系统的影响[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(1): 21-30.