

DOI: 10.11766/trxb201801020586

华北山地土壤 CaCO_3 含量/石灰反应垂直分布特征及其发生学解释*

李超¹ 张凤荣^{1†} 王秀丽² 郑亚楠¹ 张天柱¹ 谢臻¹ 靳东升³

(1 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

(2 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

(3 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006)

摘要 为了探究华北山地土壤 CaCO_3 含量/石灰反应垂直分布特征及其发生学解释, 对北京市、山西省 257 个山地土壤剖面的机械组成、 CaCO_3 含量和石灰反应进行统计分析。结果表明: 华北山地表土的机械组成以粉砂为主, 与黄土相似, 说明黄土降尘是土壤矿物质的重要来源; 海拔 > 1 500 m 的中山和高山地区的剖面, 由于 CaCO_3 淋洗强, 造成无论何种成土母质, CaCO_3 被淋洗出土体, 土壤通体无石灰反应; 海拔介于 500 ~ 1 500 m 的中山地区和低山地区的剖面, CaCO_3 淋洗弱, 土壤普遍具有石灰反应, 成土母质对土壤中 CaCO_3 含量/石灰反应起主导作用, 生物气候条件的影响居于次要地位; 海拔 < 500 m 的低山丘陵地区的剖面, 各土层的 CaCO_3 含量/石灰反应无明显分布规律。结论: 黄土降尘为华北山地表土输入了碳酸钙, 但由于不同海拔高度地区土壤湿度存在差异, 导致土壤 CaCO_3 淋溶程度和含量差异明显。淋溶过程强弱导致的土壤 CaCO_3 含量/石灰反应垂直分布特征是华北山地土壤的典型发生学特征之一, 不同海拔高度起主导作用的因素有所不同。研究成果可为华北山地土壤调查、发生与分类研究提供参考。

关键词 华北地区; 黄土降尘; CaCO_3 含量; 石灰反应; 土壤发生

中图分类号 S159 **文献标识码** A

黄土降尘是地球表层地气系统物质交换的一种形式, 该过程有着重要的环境指征意义, 并在现代地表土壤的演化方面扮演着重要的角色。长时期的降尘沉积可能是现存表土的重要来源。已有研究表明, 华北地区黄土降尘普遍存在, 是表层土壤的重要来源, 我国的黄土高原就是二三百万年以来, 源自中国西北部和中亚内陆的沙漠和戈壁的沙尘沉积的结果^[1]。降尘对土壤的作用主要是为土壤提供了大量细矿物质颗粒和一些营养元素, 特别是向土

壤表层输入了碳酸钙。土壤 CaCO_3 含量作为土壤性质的重要指标, 对土壤的形成和发育、维护植物正常生长具有重要意义^[2-4]。

国内外相关学者围绕降尘对土壤性质的影响展开了大量研究^[5]。降尘增加了土壤中的细矿物质颗粒、土壤孔隙度和保水、保肥性, 加速了高山土壤的发育和演化^[6]。Tiessen 等^[7] 研究表明来自撒哈拉沙漠的尘埃造成加纳北部土壤碱性阳离子饱和度较高。Reynolds 等^[8]、Mctainsh 和 Strong^[9]

* 国家自然科学基金项目 (41671216) 和国家科技基础性工作专项 (2014FY110200) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671216) and the National Science and Technology Basic Work (No. 2014FY110200)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: frzhang@cau.edu.cn

作者简介: 李超 (1991—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为土壤与土地调查、土地可持续利用。E-mail: lichaonongda@163.com

收稿日期: 2018-01-02; 收到修改稿日期: 2018-03-15; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-04-11

的研究表明降尘携带有丰富的矿质营养元素, 可对土壤肥力产生重要影响, 进而影响植被、生物群落和整个生态系统的稳定性。Mizota等^[10]的研究则为日本、朝鲜不同母质上形成的原生土在土壤发育期间掺入的细石英的风积起源提供了有力证据, 日本土壤颗粒几乎不含Ca²⁺, 而当颗粒含一定量的Ca²⁺, 这些颗粒最可能的来源地就是中国的沙漠或黄土高原。关欣等^[11]研究表明降尘是造成荒漠风沙区自然土壤积盐及形成黏粒层的重要途径。有研究显示, 美国内华达州和澳大利亚一些受地下水影响地区的土壤中存在的钠化层也是由含钠降尘造成的^[5]。文倩等^[12]研究表明降尘对区域土壤的机械组成、土壤积盐、土壤肥力等物理、化学和生物性状具有重要影响。

碳酸钙是干旱区-半干旱区土壤的重要组成矿物, CaCO₃含量是反映该区域土壤形成发育程度的重要标志之一。相关研究表明, 碳酸盐在黄土中的淋失程度取决于当地的水热条件, 碳酸钙通常积聚在年降雨量 < 100 mm 的地区^[13], 在土壤湿度和植物根系活动均很低的干旱季节, 碳酸盐能够快速沉淀下来^[14]; 在美国大平原中东部地区, 当年均降雨量超过650 mm时, 表土层(0~25 cm)就不再含有碳酸钙^[15]; 中国北方粉尘源区表土

CaCO₃含量在水平空间上随纬度大致呈自西向东逐渐降低的趋势^[16]。张凤荣等^[17]及王秀丽等^[18]研究发现北京花岗岩上发育的土壤也有石灰性反应, 证实是受风成黄土影响所致, 进一步说明了华北地区黄土降尘普遍存在, 是土壤物质的重要来源。但有关我国黄土降尘区山地土壤CaCO₃含量垂直分布特征及其发生学解释方面的报道还较为罕见。为此, 本文对北京市和山西省257个山地典型土壤剖面土壤CaCO₃含量及石灰反应进行统计分析, 并与海拔高度、成土母质、生物气候条件等因素进行相关分析, 旨在揭示华北山地黄土降尘区土壤环境条件对CaCO₃含量或石灰性反应的影响。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与分析

在分析整理华北地区有关土壤调查和研究资料的基础上, 依据北京市和山西省1:20万地质图、第二次全国土壤普查成果, 考虑成土母质的差异性, 在丘陵(<500 m)、低山(500~800 m)、中山(800~3 000 m)、高山(>3 000 m)等不同海拔高度区域设置了257个剖面点(图1)。各剖面点土壤环境信息如表1所示。

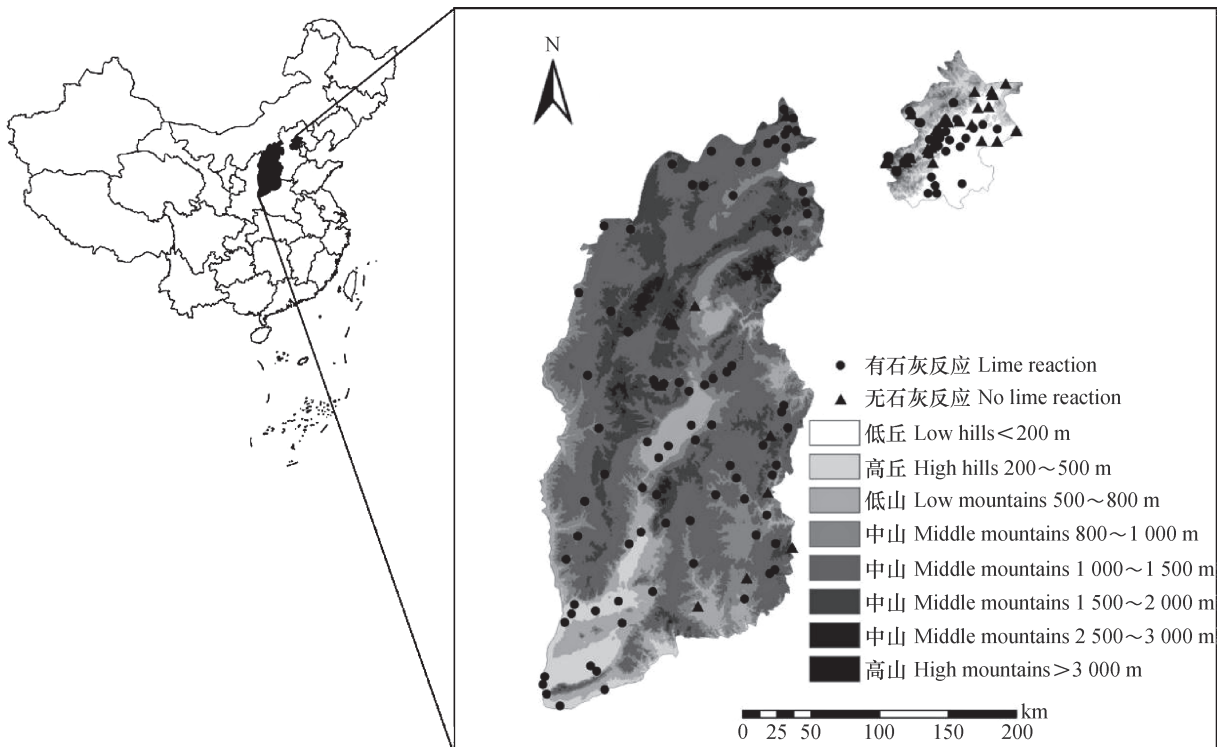


图1 土壤剖面点位置及石灰反应分布图

Fig. 1 Distribution map of the studied soil profiles and lime reaction

表1 不同海拔高度剖面点的土壤环境信息

Table 1 Environmental information of the studied soil profiles relative to elevation

地区 Region	海拔高度 Altitudes/m	样点数 Number of points	50 cm深度 土温状况 Soil temperature regime	年均降雨 量 Rainfall/ mm	土壤水分状 况 Soil moisture regime	成土母质类型 Parent materials	土地利用类型 Landuse types	植被类型 Vegetation type	
北京市 Beijing City	高山 High mountains	>3 000	0			-			
		2 000 ~ 3 000	0			-			
	中山 Middle mountains	1 500 ~ 2 000	8	寒性	600 ~ 650	湿润/潮湿	黄土、花岗岩风化 坡积物等	林地、荒草地	乔木、旱生灌 草等
		1 000 ~ 1 500	32	冷性/温性	500 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、安 山岩、砂页岩、石 灰岩风化残-坡积 物等	林地、荒草地	乔木、旱生灌 草等
		800 ~ 1 000	16	冷性/温性	500 ~ 600	半干润/湿润		林地、荒草地	乔木、旱生灌 草等
	低山 Low mountains	500 ~ 800	31	冷性/温性	500 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、安 山岩、砂页岩、石 灰岩风化残-坡积 物等	林地、耕地、 园地、荒草地	乔木、旱生灌 草等
山西省 Shanxi Province	丘陵 Hills	200 ~ 500	28	温性	450 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、白 云岩、砾岩、砂页 岩风化残-坡积物 等	耕地、园地、 林地、荒草地	旱生灌草、乔 木等
		<200	32	温性	450 ~ 600	半干润/湿润			
	高山 High mountains	>3 000	2	寒冻	600 ~ 650	湿润/潮湿	黄土	天然草地	草甸植被
		2 000 ~ 3 000	26	寒冻/寒性	600 ~ 800	湿润/潮湿	黄土、花岗岩风化 坡积物等	天然草地、林 地	草甸植被、乔 木等
	中山 Middle mountains	1 500 ~ 2 000	22	寒性	600 ~ 750	湿润/潮湿	黄土、花岗岩、紫 色砂页岩、石灰岩 风化残-坡积物等	林地、荒草地	乔木、旱生灌 草等
	1 000 ~ 1 500	32	冷性/温性	400 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、紫 色砂页岩、石灰岩 风化残-坡积物等	林地、荒草 地、耕地	乔木、旱生灌 草等	
	800 ~ 1 000	12	冷性/温性	400 ~ 600	半干润/湿润		林地、荒草 地、耕地	乔木、旱生灌 草等	
低山 Low mountains	500 ~ 800	8	冷性/温性	400 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、紫 色砂页岩、石灰岩 风化残-坡积物等	耕地、林地、 荒草地	旱生灌草、乔 木等	
丘陵 Hills	200 ~ 500	8	温性/热性	400 ~ 600	半干润/湿润	黄土、花岗岩、紫 色砂页岩、石灰岩 风化残-坡积物等	耕地、林地、 荒草地	旱生灌草、乔 木等	
	<200	0				-			

按照《野外土壤描述与采样手册》^[19], 挖掘土壤剖面(宽1.2 m×深1.2~1.5 m或至基岩出露面), 观察成土因素、划分发生层次和描述剖面形态。

采集的发生层土样经风干、去杂、比色、研磨、过不同孔径筛后, 分别测定机械组成、pH、CaCO₃含量、阳离子交换量(CEC)、盐基饱和度(BS)、全盐量和交换性钠饱和度(ESP)。其中, 土壤机械组成采用吸管法测定; pH采用电位法测定, 水浸提(水土比2.5:1); CaCO₃含量采用气量法测定^[20]。

根据《中国土壤系统分类检索(第三版)》^[21]和《中国土壤系统分类土族和土系划分标准》^[22]确定各剖面的土壤系统分类归属。

1.2 统计方法

数据处理和统计分析采用Microsoft EXCEL 2013和IBM Statistics SPSS23.0进行, 异常值剔除按照“平均值±3倍标准差”方法^[23]。利用SPSS 23.0, 采用单样本Kolmogorov-Smirnov非参数检验(简称“K-S检验”, $\alpha=0.01$)对257个剖面点的各土壤粒径含量进行正态分布检验, 并对不符合正态分布的统计数据进行转换^[24-25]。用变异系数来量化符合正态分布的257个剖面点的各土层粒径含量的空间变异程度^[26]。

2 结 果

2.1 土壤基本理化特征

257个剖面点的表土理化性质测定结果: pH均值为7.84, CaCO₃含量均值为19.67 g·kg⁻¹, 交换性

盐基离子以Ca²⁺为主, 盐基均呈饱和状态。由各剖面表层土壤颗粒组成可以看出, 土壤颗粒组成以粉粒为主, 粉粒(0.05~0.002 mm)含量高达37.40%~73.19%, 平均含量为54.35%, 其次为砂粒(2~0.05 mm), 黏粒(<0.002 mm)含量最低, 大都在10%~30%左右。这与我国黄土颗粒组成中以粉粒为主的基本特征相似, 与有关学者所做的尘粒在空气中悬浮和搬运性能的实验结果^[27-28]也相吻合。说明各剖面点表土大都具有与黄土性质相似的基本物理性质^[18], 表土的形成与黄土降尘有关。由各土样黏粒、粉粒、砂粒含量变异系数可以看出, 华北黄土降尘山地表土颗粒组成变异性为黏粒>砂粒>粉粒, 粉粒含量变异系数<15%, 变异水平较低; 砂粒和黏粒含量的变异系数均>30%, 达到中等变异水平。砂粒、黏粒较高的变异程度, 一是由于其含量低, 二是受各剖面点的成土母质差异影响造成; 而粉粒的低变异性也再次证明了各剖面点表土母质来源主要为黄土降尘。砂粒、粉粒、黏粒含量的K-S检验结果说明它们来源相同。

由于华北地区冬春季多发大气干沉降过程, 其黄土物质来源于我国西部、北部的沙漠和戈壁地区, 黄土降尘物质中富含碳酸钙, 例如2006年4月16—18日的浮尘天气过程中北京市的降尘量高达20 g·m⁻², 且CaCO₃含量大致为76.8 g·kg⁻¹, 这也是华北降尘地区表土碳酸钙的主要来源之一^[29-30]。

依据野外用稀盐酸测定石灰反应(泡沫)程度和实验室测定CaCO₃含量结果, 257个剖面点中,

表2 剖面点的表土颗粒组成分布特征

Table 2 Mechanical composition of the topsoils of the soil profiles

土壤颗粒组成 Soil particle composition	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Mean/%	变异系 数 CV/%	偏度Skew	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
砂粒Sand (2~0.05 mm)	8.05	39.80	25.48	33.69	-0.01	-1.12	正态分布
粉粒Silt (0.05~0.002 mm)	37.40	73.19	54.35	13.67	0.16	-0.37	正态分布
黏粒Clay (<0.002 mm)	7.11	42.40	20.17	35.49	0.99	1.15	正态分布

82个无石灰反应, 62个为轻度石灰反应, 45个为中度石灰反应, 63个为强石灰反应, 49个为极强石灰反应。 CaCO_3 含量范围为 $0.1 \sim 251.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $56.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为76.93%, 属高变异水平, 具有良好的分异性。

为了分析不同海拔高度表层及表层以下各发生层(深至150 cm)土样 CaCO_3 含量的分布特征, 借助ArcGIS软件空间分析功能, 将257个剖面点位置信息与高程图进行叠加分析(图1), 按照海拔高度、成土母质等差异, 对257个剖面点表层及表层以下各发生层的石灰反应强度、 CaCO_3 含量测定结果进行分类汇总、统计分析, 结果表明:(1)海拔大于1 500 m的中山和高山地区, 合计有58个剖面点, 虽然成土母质分别为不同时期黄土、花岗岩、紫色砂页岩或石灰岩的风化残-坡积物等, 但这些剖面通体均无石灰反应, 实验室测定 CaCO_3 含量介于 $0.1 \sim 2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。(2)海拔介于500~1 500 m中山和低山地区, 合计有131个剖面点, 通体具有石灰反应, 但石灰反应强度、 CaCO_3 含量受成土母质类型的影响, 分异特征明显, 表现为: ①花岗岩发育的土壤(49个剖面点), 其通体多具有轻度-中度石灰反应, CaCO_3 含量介于 $9.92 \sim 70.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $28.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; ②马兰黄土、钙质紫色砂岩、石灰岩等发育的土壤(82个剖面点), 其通体多具有中度-强石灰反应, CaCO_3 含量介于 $2.2 \sim 251.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $79.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。(3)海拔小于500 m丘陵地区, 合计有68个剖面点, 可能是受微地形条件和人为干扰等因素影响, 土体中 CaCO_3 含量和石灰反应无明显分布规律。

2.2 不同海拔高度对土壤 CaCO_3 含量分布的影响

为了探讨不同海拔高度对土壤 CaCO_3 含量分布的影响, 选取位于不同海拔高度的11个典型剖面点, 从发生学角度分析影响华北地区不同海拔高度山地土壤 CaCO_3 含量分异特征的因素。各土壤剖面点所处的地貌和地形部位相似, 均位于华北地区不同海拔高度的山坡上, 按海拔高度分属低山(高程 $< 500 \text{ m}$)、中山(高程介于 $800 \sim 3 000 \text{ m}$)和高山(高程 $> 3 000 \text{ m}$), 其中海拔最低的为位于北京市延庆县八达岭滑雪场的八达岭系, 高程为650 m; 海拔最高的为位于山西省五台县台怀镇北台顶的北台顶系, 高程为3 050 m。成土母质类型包括黄土、花岗岩、石灰岩、紫色砂岩风化残-坡积物

等, 均为华北地区主要的成土母质类型, 各剖面颗粒组成分析结果显示均含有大量粉粒, 说明土壤的形成和发育过程受到黄土降尘影响。各剖面点的土壤环境特征如表3所示, 随着海拔高度的升高, 降雨量、气温、植被类型等生物气候条件分异明显, 植被类型由低山地区指示半干旱半湿润区的旱生灌草, 逐渐过渡为中山和高山地区指示湿润区的乔木林和草原性草甸植被, 基本可反映华北山地不同海拔区域典型植被类型的梯度变化特征。

由各剖面点的生物气候条件可以看出: 随着剖面点所处海拔高度的升高, 降雨量增大、气温降低, 土壤温度状况由温性逐渐过渡为寒冻/寒性, 土壤水分状况由半干润逐渐过渡为湿润/潮湿, 植被也变茂密。

由各剖面点的土壤 CaCO_3 含量、石灰反应和pH可以看出: 随着调查剖面所处海拔高度的升高, 土壤中 CaCO_3 含量、石灰反应强度、pH呈逐渐降低的趋势。

1) 位于海拔较高地区(海拔 $> 1 500 \text{ m}$)的北台顶系、岭底系、荷叶坪系、东台沟系、灵山落叶系、灵山系, 剖面通体均无石灰性反应, 且 CaCO_3 含量 $< 2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH介于 $6 \sim 7.1$ 。其土壤环境条件为降雨量 $> 600 \text{ mm}$ 、寒冻/寒性土壤温度状况、潮湿/湿润土壤水分状况、植被茂密。

2) 位于海拔较低地区(海拔介于 $500 \sim 1 500 \text{ m}$)的坪地川系、上东村系、左家滩系、青龙桥系和八达岭系, 通体均具石灰性反应, 且 CaCO_3 含量 $> 2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH介于 $7.6 \sim 8.2$ 。其土壤环境条件为降雨量 $< 600 \text{ mm}$, 冷性/温性土壤温度状况、半干润土壤水分状况、植被较稀疏。

根据 CaCO_3 淋溶淀积原理, 当 CaCO_3 遇到溶有 CO_2 的水时, CaCO_3 会反应生成溶解性较大的重碳酸钙: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, 而使 CaCO_3 发生淋洗; 反之, 水分减少或 CO_2 分压降低时, 溶解的重碳酸钙就会重新生成碳酸钙沉积下来($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$)。 CaCO_3 的淋溶强度及淀积深度受水热条件的制约, 一般而言, 土壤湿润期越长, 淋溶强度越大, CaCO_3 的淋洗深度越深, 反之则浅。高山地区降雨量大, 且温度较低, 使得土壤相对湿度增加, 植被较好, 水分地表径流少, 土壤中 CaCO_3 与水和 CO_2 作用形成重碳酸钙向下垂直淋洗, 特别是在高温多雨的夏季, 土

表3 代表性调查剖面点的土壤环境特征

Table 3 Soil environmental characteristics of the representative soil profiles

土系命名 Name of the soil series	坐标位置 Position coordinates	海拔 Altitudes/ m	降雨量 Rainfall/ mm	50 cm深度土温状况 Soil temperature regime of 50 cm	土壤水分状况 Soil moisture regime	地貌部位 Landforms	坡度 Slope	母质 Parent materials	植被类型 Vegetation type
北台顶系 Beitaiding series	39° 4' 48.29" N, 113° 34' 8.97" E	3 050	620	寒冻	湿润	亚高山山 顶	5° ~ 8°	黄土降尘与花岗 岩风化物	草甸植被
岭底系 Lingdi series	39° 4' 9.39" N, 113° 35' 23.25" E	2 697	623	寒冻	湿润	中山山坡	5° ~ 8°	黄土降尘与花岗 岩风化物	草甸植被
荷叶坪系 Heyeping series	38° 43' 30.09" N, 111° 50' 34.51" E	2 315	617	寒冻	湿润	中山山坡	2° ~ 5°	黄土	草原性草甸植物
东台沟系 Dongtaigou series	39° 2' 35.25" N, 113° 36' 53.21" E	2 168	641	寒性	湿润	中山山坡	2° ~ 5°	黄土	乔木 (华北落叶 松)
灵山落叶系 Lingshanluoye series	40° 2' 16.70" N, 115° 28' 4.70" E	1 955	606	寒性	湿润	中山山坡	25° ~ 35°	黄土	乔木 (华北落叶 松)
灵山系 Lingshan series	40° 2' 22.80" N, 115° 29' 09.40" E	1 660	610	寒性	湿润	中山山坡	25°	黄土降尘与花岗 岩风化碎屑	乔木 (桦树)
坪地川系 Pingdichuan series	37° 19' 45.57" N, 113° 44' 09.84" E	1 493	575	冷性	半湿润	中山山坡	15°	黄土降尘与石灰 岩风化物碎屑	旱生灌木
上东村系 Shangdongcun series	36° 7' 43.34" N, 110° 38' 51.11" E	1 027	576	温性	半湿润	高丘残垣	5°	马兰黄土	旱生灌木
左家滩系 Zuojiatan series	37° 16' 47.66" N, 112° 28' 44.02" E	852	490	温性	半湿润	中山山坡	20°	黄土降尘与紫色 砂岩风化物碎屑	旱生灌木
青龙桥系 Qinglongqiao series	40° 20' 56.61" N, 115° 58' 38.32" E	663	545	温性	半湿润	低山坡	15°	黄土降尘与花岗 岩风化碎屑	旱生灌木
八达岭系 Badaling series	40° 21' 16.01" N, 115° 57' 17.22" E	650	525	温性	半湿润	低山坡	15° ~ 25°	黄土降尘与花岗 岩风化物碎屑	旱生灌木

表4 代表性调查剖面点表层土壤基本性质

Table 4 Basic properties of topsoil of the representative soil profiles

土系名称 Name of soil series	表层深度 Topsoil depth/cm	石灰反应 Lime reaction	CaCO ₃ 含量 CaCO ₃ content/ (g·kg ⁻¹)		pH	颗粒组成 Particle composition/mm		质地 Soil texture	碳酸钙新生体 CaCO ₃ new growth	备注 Comments
			2~0.05	0.05~0.002		<0.002	<0.002			
北台顶系 Beitaiding series	10	无	0.4	495	6	354	151	壤土	无	土层厚度45 cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量0.5 g·kg ⁻¹
岭底系 Lingdi series	13	无	0.2	452	6	256	292	黏壤土	无	土层厚度78cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量0.36 g·kg ⁻¹
荷叶坪系 Heyeping series	5	无	0.5	418	6.2	368	214	壤土	无	土层厚度160 cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量0.25 g·kg ⁻¹
东台沟系 Dongtaigou series	7	无	0.6	504	6.2	332	164	粉砂壤土	无	土层厚度48cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量0.1 g·kg ⁻¹
灵山落叶系 Lingshanluoye series	20	无	1.8	653	6.4	173	175	粉砂壤土	无	土层厚度50 cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量2.2 g·kg ⁻¹
灵山系 Lingshan series	18	无	1.4	512	6.8	350	138	粉砂壤土	无	土层厚度60 cm, 表层以下无石灰反应, CaCO ₃ 含量1.7 g·kg ⁻¹
坪地川系 Pingdichuan series	9	强	23.8	576	8.2	199	225	粉砂壤土	无	土层厚度81cm, 表层以下强石灰反应, CaCO ₃ 含量36.1 g·kg ⁻¹
上东村系 Shangdongcun series	20	极强	86.8	692	8.7	147	161	粉砂壤土	无	土层厚度150 cm, 表层以下极强石灰反应, CaCO ₃ 含量113.3 g·kg ⁻¹
左家滩系 Zuojiatan series	18	极强	91.0	425	8.4	461	114	壤土	无	土层厚度60 cm, 表层以下极强石灰反应, CaCO ₃ 含量103.0 g·kg ⁻¹
青龙桥系 Qinglongqiao series	18	轻度	2.2	487	7.6	398	115	粉砂壤土	<5%的假菌丝体	土层厚度100 cm, 表层以下轻度石灰反应, CaCO ₃ 含量5.75 g·kg ⁻¹
八达岭系 Badaling series	30	轻度	5.5	438	8.2	429	133	粉砂壤土	5%左右的假菌丝体	土层厚度50 cm, 表层以下轻度石灰反应, CaCO ₃ 含量4.4 g·kg ⁻¹

壤有机碳的矿化速率和生物呼吸速率均较高, 从而提高了土壤空气中CO₂的分压, CaCO₃的淋洗较强烈^[31], 导致表土和表下层各层土壤均不具石灰反应。因此, 生物气候条件是造成华北山地较高山(海拔大于1 500 m)与较低山(海拔小于1 500 m)地区间土壤CaCO₃含量分异的主导因素, 华北山地中山和高山地区(海拔大于1 500 m)无论何种成土母质, 土壤中均不含碳酸钙, 无石灰反应。

由表2和表3可以看出, 海拔小于1 500 m中山和低山地区不同母质类型的上东村系、坪地川系、左家滩系、八达岭系和青龙桥系CaCO₃含量差异明显, 上东村系、坪地川系和左家滩系等发育于马兰黄土和钙质的石灰岩、紫色砂岩的土壤, 通体CaCO₃含量均较高, 具有中等-强石灰反应; 而八达岭系和青龙桥系等发育于非钙质的花岗岩的土壤, 通体CaCO₃含量均较低, 具有轻度石灰反应。这是由于海拔小于1 500 m中山和低山地区, 降雨量较少、温度较高, 且蒸发量大, 致使土壤干燥、土壤湿润期短, 土壤CaCO₃与水作用形成重碳酸钙的时间较短, 不利于碳酸钙淋洗; 同时, 由于这些地区通常植被覆盖较差, 水分表面径流大, 土体受土壤侵蚀影响较严重, 使得马兰黄土钙质石灰岩、紫色砂岩等成土母质出露地表, 造成上东村系、坪地川系、左家滩系等具有较强石灰反应。因此, 成土母质差异是造成华北山地中山和低山地区(海拔介于500~1 500 m)内土壤CaCO₃含量分异的主导因素。

3 讨 论

黄土降尘为华北山地表土输入了CaCO₃, 中国北方年均降尘量约136.98 t·km⁻²^[34], 中国粉尘源区表土CaCO₃含量的均值约为118.4 g·kg⁻¹^[16], 说明黄土降尘向华北山地表土输入的最高CaCO₃含量大致为118.4 g·kg⁻¹。但不同海拔高度的降雨量和土壤湿度差异, 导致土壤CaCO₃淋溶强度和含量差异明显。以本研究中77个花岗岩发育的土壤剖面为例, 其表土CaCO₃含量和环境因子进行的统计分析表明: 在海拔高度大于1 500 m中山和高山地区, 降雨量大于600 mm, CaCO₃淋溶强度较大, 土壤中CaCO₃残留量小于等于2 g·kg⁻¹, CaCO₃淋失量大于等于16.4 g·kg⁻¹; 而在海拔介于500~1 500 m

中山和低山地区, 降雨量一般介于400~600 mm, CaCO₃淋溶强度较弱, 土壤中CaCO₃残留量大于等于2.2 g·kg⁻¹, CaCO₃淋失量小于等于116.2 g·kg⁻¹。

以往有关华北山地土壤发生与分类的研究, 或在土壤地理发生学思想指导下过于强调生物气候条件是土壤发生过程中的主导作用, 弱化了母质的影响^[32]。但也有一些研究又过分强调了母质在土壤发生过程中的主导作用, 弱化了生物气候条件的影响^[33]。本文认为, 华北黄土降尘地区, 尤其是山地区, 在研究土壤发生和分类时, 生物气候条件和成土母质一定要兼顾考虑。淋溶过程强弱导致的土壤CaCO₃含量/石灰反应分布差异是该地区的典型发生学特征之一, 不同海拔高度起主导作用的因素有所不同: 在海拔大于1 500 m中山和高山地区, 降雨量一般大于600 mm, 淋溶条件较强, 生物气候条件对土壤中CaCO₃含量/石灰反应起主导作用, CaCO₃含量一般介于0.1~2 g·kg⁻¹; 而在海拔介于500~1 500 m中山和低山地区, 降雨量较低, 一般介于400~600 mm, 淋溶条件不强, 土壤普遍具有石灰反应, 成土母质对土壤中CaCO₃含量/石灰反应起主导作用, 生物气候条件的影响居于次要地位, CaCO₃含量一般介于2.2~251.3 g·kg⁻¹。

257个剖面点的表土理化性质测定结果表明, 各剖面点表土都具有与风成黄土相似的基本物理性质, 进一步证实了华北地区黄土降尘普遍存在, 说明黄土降尘是华北地区土壤物质的重要来源, 对于土壤形成产生了重要作用。因此, 在研究华北山地土壤成土过程时, 除考虑传统的母质、地形、气候、生物、时间五大成土因素外, 还应增加地质因素, 尤其是将现代黄土降尘这个地质过程予以重点考虑。

本文所选用的82个无石灰反应剖面点(58个海拔大于1 500 m剖面点, 24个海拔小于1 500 m剖面点)的土壤理化性质测定结果表明均含微量或少量CaCO₃(多低于2 g·kg⁻¹), 这主要可能是该地区不断的黄土降尘补充影响。

本文仅在设定或假定土壤发育不受海拔以外其他成土因素影响的前提下, 就黄土降尘在不同海拔高度下引起的土壤CaCO₃含量/石灰反应的变化情况进行了对比分析, 但实际上土壤形成过程一定是受多因素综合作用, 而其他地形因子(如坡度、坡位、坡向、地形起伏度等)、成土时间、土地利用

等人为活动对土壤CaCO₃和石灰反应的影响,将在今后的研究中予以探讨。

4 结 论

黄土降尘为华北山地表土输入了CaCO₃,但由于海拔高度不同,其土壤湿度存在差异,导致土壤CaCO₃淋溶程度和含量上差异明显。海拔大于1 500 m中山和高山地区,温度较低,降雨量较强,土壤湿度较大,植被条件较好,地表径流少, CaCO₃淋洗强,土壤通体无石灰反应,生物气候条件对CaCO₃含量/石灰反应起主导作用。而海拔介于500~1 500 m中山和低山地区,温度较高,降雨较少,土壤湿度较低,植被覆盖度较低, CaCO₃淋洗弱,土壤普遍具有石灰反应,成土母质对土壤中CaCO₃含量/石灰反应起主导作用,生物气候条件的影响居于次要地位。

参 考 文 献

- [1] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
Liu D S. Loess and environment (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [2] Chenu C. Basic concepts and future challenges. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 35—42
- [3] 李富程, 张建辉. 碳酸钙对石灰性土壤颗粒组成测定的影响. 土壤通报, 2013, 44 (1): 191—196
Li F C, Zhang J H. Changes in soil particle-size distribution by laser diffraction method as affected by calcium carbonate in calcareous soils (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (1): 191—196
- [4] Li W. Chemical modification of dust particles during different dust storm episodes. Aerosol & Air Quality Research, 2012, 12 (6): 1095—1104
- [5] 文倩, 戴君峰, 崔卫国, 等. 关于现代浮尘研究与进展. 干旱区研究, 2001, 18 (4): 68—71
Wen Q, Dai J F, Cui W G, et al. Study and progresses on floating-dust (In Chinese). Arid Zone Research, 2001, 18 (4): 68—71
- [6] Litaor M I. The influence of eolian dust on the genesis of alpine soils in the front range, Colorado. Soil Science Society of America Journal, 1985, 51 (1): 142—147
- [7] Tiessen H, Hauffe H K, Mermut A R. Deposition of harmattan dust and its influence on base saturation of soils in northern Ghana. Geoderma, 1991, 49 (3/4): 285—299
- [8] Reynolds R, Belnap J, Reheis M, et al. Aeolian dust in Colorado Plateau soils: Nutrient inputs and recent change in source. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98 (13): 7123—7127
- [9] Mctainsh G, Strong C. The role of aeolian dust in ecosystems. Geomorphology, 2007, 89 (1/2): 39—54
- [10] Mizota C, Endo H, Um K T, et al. The eolian origin of silty mantle in sedentary soils from Korea and Japan. Geoderma, 1991, 49 (1/2): 153—164
- [11] 关欣, 李巧云, 文倩, 等. 南疆西部降尘对土壤性质的影响. 土壤, 2000, 32 (4): 178—182
Guan X, Li Q Y, Wen Q, et al. Effect of dustfall on soil properties in western South Xinjiang (In Chinese). Soils, 2000, 32 (4): 178—182
- [12] 文倩, 关欣, 崔卫国. 和田地区大气降尘对土壤作用的研究. 干旱区研究, 2002, 19 (3): 1—5
Wen Q, Guan X, Cui W G. Study on dustfall and its effect on soils in Hotan (In Chinese). Arid Zone Research, 2002, 19 (3): 1—5
- [13] Jenny H. The soil resource: Origin and behavior. New York: Springer-Verlag, 1980
- [14] Schlesinger W H. The formation of caliche in soils of the Mojave Desert, California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49 (1): 57—66
- [15] Brady N C. The nature and properties of soils. New York: Macmillan Company, 1996: 1—9
- [16] 王亚强, 曹军骥, 张小曳, 等. 中国粉尘源区表土碳酸盐含量与碳氧同位素组成. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24 (1): 113—117
Wang Y Q, Cao J J, Zhang X Y, et al. Carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of surface soil in the dust source regions of China (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24 (1): 113—117
- [17] 张凤荣. 土壤地理学. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2016
Zhang F R. Soil geography (In Chinese). 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016
- [18] 王秀丽, 张凤荣, 吴昊, 等. 黄土降尘对北京山地土壤性质的影响. 土壤通报, 2013, 44 (3): 522—525
Wang X L, Zhang F R, Wu H, et al. Effect of loess dust on soil properties in Beijing mountainous areas (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (3): 522—525
- [19] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册. 北京: 科学出版社, 2017

- Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling (In Chinese). Beijing: Science Press, 2017
- [20] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012
- Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [21] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001
- [22] 张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准. 土壤学报, 2013, 50 (4): 826—834
- Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese Soil Taxonomy (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (4): 826—834
- [23] 李超, 张凤荣, 张天柱, 等. 土壤的石灰反应强度估测CaCO₃含量和pH研究. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1369—1376
- Li C, Zhang F R, Zhang T Z, et al. The study of lime soil reaction intensity estimates based on CaCO₃ content and pH (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (6): 1369—1376
- [24] Watson G S, Journel A G, Huijbregts C J. Mining geostatistic. Journal of the American Statistical Association, 1980, 75 (369): 245
- [25] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 等. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析. 生态学报, 2006, 26 (9): 2827—2833
- Jia X H, Li X R, Zhang J G, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (9): 2827—2833
- [26] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域不同地形下土壤性质分布特征. 自然资源学报, 2007, 22 (6): 946—953
- Wei X R, Shao M A. Distribution of soil properties as affected by landforms in small watershed of loessial gully region (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2007, 22 (6): 946—953
- [27] 孙向阳, 耿增超. 尘暴黄土母质上发育的森林土壤—例. 西北林学院学报, 1996, 11 (1): 9—13
- Sun X Y, Geng Z C. An example of forest soil developed on the parent materials of dust storm loess (In Chinese). Journal of Northwest Forestry College, 1996, 11 (1): 9—13
- [28] 王赞红, 夏正楷. 北京2002年3月20~21日尘暴过程的降尘量与降尘粒度特征. 第四纪研究, 2004, 24 (1): 95—99
- Wang Z H, Xia Z K. Dust flux and particle size of dustfall of the duststorm on March 20-21, 2002 in Beijing (In Chinese). Quaternary Sciences, 2004, 24 (1): 95—99
- [29] 刘东生, 韩家懋, 张德二, 等. 降尘与人类世沉积—I: 北京2006年4月16~17日降尘初步分析. 第四纪研究, 2006, 26 (4): 628—633
- Liu D S, Han J M, Zhang D E, et al. Falling dust and deposits in Anthropogene—I: Preliminary analyses of the dust fall in Beijing on April (In Chinese). Quaternary Sciences, 2006, 26 (4): 628—633
- [30] Feng J L, Zhu L P, Ju J T, et al. Heavy dust fall in Beijing, on April 16-17, 2006: Geochemical properties and indications of the dust provenance. Geochemical Journal, 2010, 42 (2): 221—236
- [31] 张林, 孙向阳, 高程达, 等. 荒漠草原土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存CO₂的研究. 土壤学报, 2011, 48 (3): 578—586
- Zhang L, Sun X Y, Gao C D, et al. CO₂ sequestration information and turnover of pedogenic carbonates in soil of desert steppe, Inner Mongolia, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (3): 576—586
- [32] 张甘霖, 史学正, 龚子同. 中国土壤地理学发展的回顾与展望. 土壤学报, 2008, 45 (5): 792—801
- Zhang G L, Shi X Z, Gong Z T. Retrospect and prospect of soil geography in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 792—801
- [33] 张凤荣, 李连捷. 关于北京地区褐土的发生与分类问题的辨析. 土壤通报, 1989, 20 (2): 58—61
- Zhang F R, Li L J. Analysis of cinnamon soil classification in Beijing area (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1989, 20 (2): 58—61
- [34] 鹿化煜, 李郎平, 弋双文, 等. 中国北方沙漠-黄土体系的沉积和侵蚀过程与未来趋向探析. 地学前缘, 2010, 17 (5): 336—344
- Lu H Y, Li L P, Yi S W, et al. A perspective on deposition and erosion of the sand-loess system in North China (In Chinese). Earth Science Frontiers, 2010, 17 (5): 336—344

Vertical Distribution of Soil CaCO₃ Content / Lime Reaction in Mountainous Regions of North China and Its Genetic Explanation

LI Chao¹ ZHANG Fengrong^{1†} WANG Xiuli² ZHENG Yanan¹ ZHANG Tianzhu¹ XIE Zhen¹
JIN Dongsheng³

(1 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(3 Institute of Agriculture Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract 【Objective】 Papers available in the literature show that loess dust precipitation exists generally in North China, becoming an important source of topsoil in the region. It brings in a large amount of fine mineral particles and nutrient elements, especially, CaCO₃, to the soil. CaCO₃ is an important component of the soils in arid, semi-arid and semi-humid regions, and hence a major indicator reflecting development degree of a soil. The purpose of this paper is to study vertical distribution of CaCO₃ content and its characteristics in the mountainous soil of North China, in an attempt to explain causes of this phenomenon from the perspective of soil genesis. 【Method】 A total of 257 soil profiles of various soil series in Beijing and Shanxi Province were investigated for mechanical composition, CaCO₃ content and lime reaction and statistic analysis was performed of the data. On such a basis, vertical distributions of CaCO₃ content and lime reaction in the mountainous soils of North China and their characteristics were summarized, and causes of the phenomena explained with the theory of soil genesis. 【Result】 Results show that the topsoil in North China is mainly composed of silt, which is similar to loess, indicating that loess dust precipitation is an important source of soil minerals, bringing in CaCO₃ to the topsoils of the mountainous soils in North China. As soil humidity varies sharply from area to area due to difference in elevation, soil CaCO₃ content does too. In areas above 1 500 meters in elevation, the soils are quite high in humidity (varying in the humid and damp regime) due to relatively high precipitation (mean annual precipitation of over 600 mm) and relatively low temperature (varying in the gelic or cryic soil temperature regime), and good to vegetation, which in turn reduces surface runoff, but enhances downward leaching of CaCO₃. As a result CaCO₃ is leached out of the soil, no matter what it is derived from, and no lime reaction is detected throughout the solum. So in these areas, bio-climatic conditions play a leading role affecting soil CaCO₃ content and lime reaction. However, in areas ranging between 500 and 1 500 meters in elevation, the soils are relatively low in soil humidity (varying in the semi-arid-humid/humid regime) due to relatively low precipitation (mean annual precipitation of < 600 mm) and higher soil temperature (varying in the frigid/temperate regime), and hence not so good to vegetation, As a result, CaCO₃ leaching is weakened and lime reaction could be found almost everywhere. Therefore in these areas bio-climate conditions descend from the leading role to a major role, following behind the role of parent material. Whatever, no obvious characteristic of the distribution of soil CaCO₃ content and lime reaction could be summarized in areas below 500 meters in elevation. 【Conclusion】 In conclusion, the characteristics of the vertical distribution of soil CaCO₃ content / lime reaction caused by leaching process, strong or weak, is one of the typical soil genetic characteristics of the mountainous soils in North China.

Key words North China; Loess dust precipitation; CaCO₃ content; Lime reaction; Soil genesis

(责任编辑: 檀满枝)