

西北黑河流域土壤pH与CaCO₃相当物含量关系研究*

林 卡^{1, 2} 李德成^{1†} 张甘霖¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 干旱-半干旱地区的石灰性土壤中pH与CaCO₃相当物含量之间有一定关系,但目前黑河流域土壤中pH与CaCO₃相当物含量之间的关系及其影响因素尚不明确。从区域、海拔、土壤母质、土壤类型、土地利用方式五个方面分析了我国西北黑河流域土壤中pH与CaCO₃相当物含量之间的关系。结果表明,黑河流域土壤pH与CaCO₃相当物含量之间存在显著的非线性相关, pH随着CaCO₃相当物含量的增加而逐渐升高,当CaCO₃相当物含量升高到某一阈值后, pH增幅迅速降低,最终趋于稳定;不同区域、海拔、土纲、成土母质和土地利用方式下, pH与CaCO₃相当物含量之间的相关程度不同,表现为上游土壤pH与CaCO₃含量呈显著正相关,不同的海拔高度区间pH与CaCO₃含量之间具显著正相关,人为土、盐成土、均腐土、雏形土的pH与CaCO₃含量显著正相关,冰碛物、残积-坡积物、湖积物发育的土壤pH与CaCO₃含量具有极显著正相关,土地利用方式对pH与CaCO₃含量的关系影响较小;不同区域、海拔、土纲、成土母质和土地利用方式下, pH与CaCO₃相当物含量的最佳回归模型不同,有幂函数模型、一元二次模型、一元三次模型和线性模型。

关键词 土壤pH; CaCO₃相当物; 黑河流域

中图分类号 S153.4 **文献标识码** A

pH和CaCO₃相当物含量(CaCO₃相当物包括土壤中各类碳酸盐,如CaCO₃、Na₂CO₃、NaHCO₃、MgCO₃等物质,以下简称CaCO₃含量)是土壤的两个重要属性,影响着土壤元素和养分的有效性、土壤质量^[1]以及土壤命名^[2-3]。干旱-半干旱地区的土壤多是富含CaCO₃的石灰性土壤^[2, 4-5],石灰性土壤中pH与CaCO₃含量之间具有一定的关系,因为CaCO₃是引起土壤碱性(pH > 7)的主要原因之一^[6]。刘世全等^[7]对西藏察雅县41个剖面105层土样(pH 6.9~8.8, CaCO₃ 3.9~252.1 g kg⁻¹)和四川中江县紫色土27个表层土样(pH 6.3~8.8, CaCO₃ 5.5~42.3 g kg⁻¹) pH和CaCO₃含量的统计分析以及贺婧等^[8]通过向典型棕壤中添加不同浓度CaCO₃(pH 5.5~8.0, CaCO₃ 7.7~227 g kg⁻¹)的室内模拟试验均表明,随着土壤CaCO₃含量的增

加, pH逐渐升高最后基本趋于稳定,两者之间呈显著的倒数关系($y=a-b/x$)。

黑河流域是我国西北地区第二大内陆流域,跨越青海、甘肃及内蒙古,流域面积约14.3万km²,其景观类型复杂、流域规模适中、社会生态环境问题突出,近年来一直是我国重点研究的内陆区域之一,围绕黑河流域开展了大量的研究工作^[9-12]。黑河流域属于干旱-半干旱区,土壤多为石灰性土壤,但黑河流域土壤pH与CaCO₃含量之间是否也表现为显著的倒数关系,成土因素和土壤类型是否影响土壤pH与CaCO₃含量之间的关系尚不明确。为此,本文旨在利用2012—2013年期间有关黑河流域的土壤调查采样测定结果,从区域、海拔、成土母质、土地利用方式和土壤类型五个方面进一步分析干旱-半干旱地区土壤pH与CaCO₃含量之间的关

* 国家自然科学基金项目(41371224, 41130530)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371224, 41130530)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dcli@issas.ac.cn

作者简介: 林 卡(1993—),女,浙江温州人,硕士研究生,土壤学专业。E-mail: klin@issas.ac.cn

收稿日期: 2016-05-14; 收到修改稿日期: 2016-07-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-08-29

系，这对于进一步提高黑河流域的土壤数字制图精度也具有积极的指导意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2012—2013年的7—8月调查采集了黑河流域合计249个剖面样点1 093个发生层的土样（图1），采样深度为1.2 m或至基岩上界面（当土壤深度<1.2 m时），其中上游108个剖面样点，471个

土样；中游75个剖面样点，302个土样；下游66个剖面样点，320个土样。样点布设基于目标采样方法，综合考虑了气候（年均气温和降雨量）、地形地貌、海拔、成土母质、土地利用、土壤类型、交通可达性。

依据野外剖面形态观察和土样测定分析结果，按中国土壤系统分类检索^[3]，249个剖面的土壤类型涉及有机土、人为土、干旱土、盐成土、潜育土、均腐土、雏形土和新成土8个土纲，继分为11个亚纲、24个土类、52个亚类。

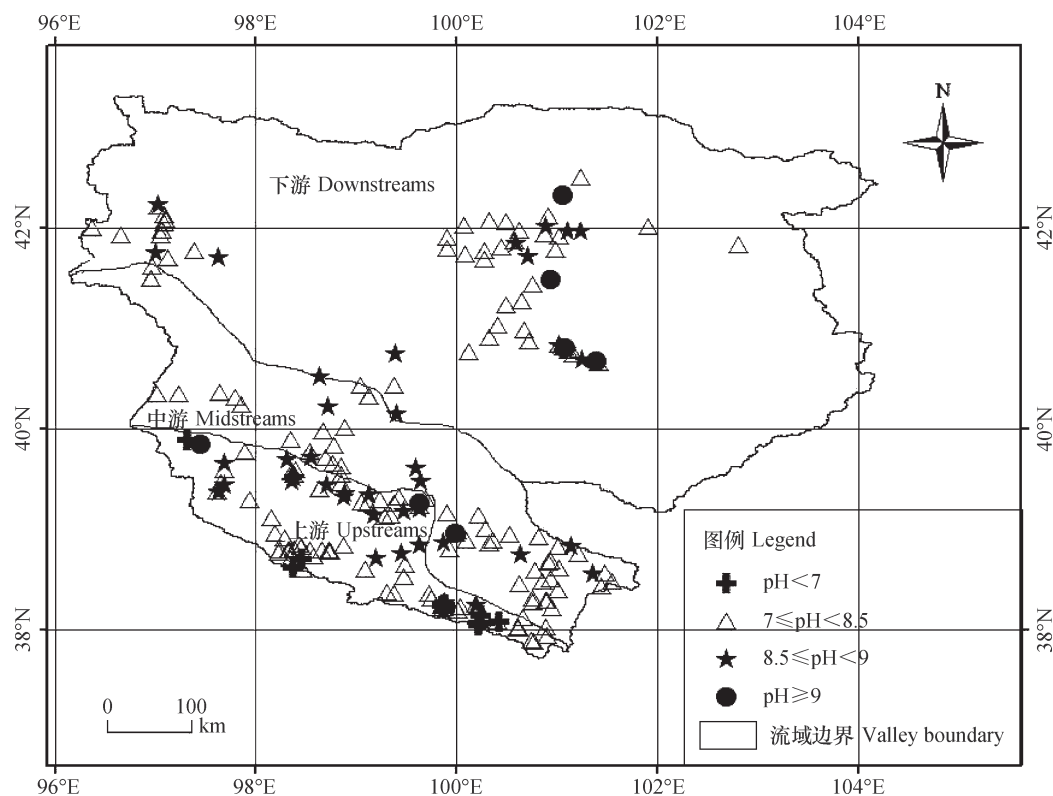


图1 黑河流域土壤调查代表性样点空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of representative soil sampling sites in the Heihe River valley

1.2 分析方法

pH采用电位法测定（土水比1：2.5），CaCO₃含量采用气量法测定^[13]。

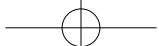
1.3 数据处理

数据处理、回归分析与制图采用Microsoft EXCEL2013、IBM Statistics SPSS 20.0和R3.1.3 for Windows。pH和CaCO₃含量的异常值剔除按平均值±3×标准差方法进行。

2 结果与讨论

2.1 土壤pH与CaCO₃含量的统计特征

表1为黑河流域及其上游、中游、下游土壤pH和CaCO₃含量的描述统计结果。整个流域土壤pH介于6.3~10.1之间，平均值为8.2；CaCO₃含量介于0.5~261.2 g kg⁻¹之间，平均值为85.54 g kg⁻¹，二者在上游、中游和下游土壤中具有显著差异



($p < 0.05$)。下游pH最高(平均值为8.6),少数样点pH大于10,这些样点为正常盐成土(大致为发生分类上的盐碱土、盐化草甸土、盐化林灌草甸土),土壤中 Na^+ 含量高。中游 CaCO_3 含量最高(平均值为 112.4 g kg^{-1}),一个重要原因是其耕地经常引富含 CaCO_3 水灌溉;下游 CaCO_3 含量最低(平均值为 64.78 g kg^{-1}),是因为下游主要是洪-冲积物母质,颗粒粗,同时下游剧烈干旱气候条件

下,碳酸钙的水解作用不强,一部分钙转化为石膏;上游 CaCO_3 含量介于中游和下游之间(平均值为 82.24 g kg^{-1}),主要是因为相对较大的降雨量可造成 CaCO_3 淋失。土壤pH平均值从上游至下游逐渐升高,与 CaCO_3 含量在上中下游变化规律不一致,表明黑河流域pH与 CaCO_3 含量的关系亦受到其他诸多因素影响。

表2为不同海拔区间的土壤pH和 CaCO_3 含量的

表1 黑河流域土壤pH和 CaCO_3 含量的描述统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil pH and content of CaCO_3 and equivalents in the Heihe River Valley					
指标 Index	区域 Area	土样数 Soil number	最小值 Min	最大值 Max	均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD
pH	上游 Upstreams	434	6.3	9.6	$8.0 \pm 0.6c$
	中游 Midstreams	298	6.7	9.5	$8.3 \pm 0.4b$
	下游 Downstreams	316	7.2	10.1	$8.6 \pm 0.7a$
	全流域 Whole Valley	1 048	6.3	10.1	8.2 ± 0.6
	上游 Upstreams	434	0.5	259.2	$82.2 \pm 68.4b$
	中游 Midstreams	298	9.3	261.2	$112.4 \pm 48.5a$
	下游 Downstreams	316	1.6	236.0	$64.8 \pm 47.1c$
CaCO_3 (g kg^{-1})	全流域 Whole Valley	1 048	0.5	261.2	85.5 ± 60.1

注: 同列不同小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: The different lowercase letters in the same column mean significant difference between groups ($p < 0.05$). The same below

描述统计结果, 海拔主要影响降雨量和温度。海拔在905 ~ 4 318 m之间, pH与海拔之间表现出了显著的负相关性 ($r = -0.45$, $n = 1\ 048$) 与pH相比, CaCO_3 含量随海拔升高的变化趋势较为复杂, 两者之间未表现出显著的相关。

表3为不同土纲的pH和 CaCO_3 含量的描述统计结果(未考虑亚纲及其以下分类单元, 是因为一些类型样点数量太少而不便统计)。其中新成土、干旱土、雏形土、盐成土样点最多, 合计占样品总数的90%。pH平均值由高至低依次为盐成土 > 潜

育土 > 干旱土 > 人为土 > 新成土 > 雏形土 > 均腐土 > 有机土, 其中pH高于9的土样多集中在盐成土、干旱土和极端干旱区的新成土, 即发生分类中的盐土、碱土、干旱土和灰棕漠土; 而 CaCO_3 含量由高至低依次为人为土 > 干旱土 > 雏形土 > 潜育土 > 盐成土 > 新成土 > 均腐土 > 有机土, 即 CaCO_3 含量高的土壤类型pH并非也高, 这也表明了pH与 CaCO_3 含量之间的非线性关系。

表4为不同土地利用类型的pH与 CaCO_3 含量描述统计结果。pH平均值由高至低依次为其他土地



表2 不同海拔pH和CaCO₃含量的描述统计

Table 2 Descriptive statistics of soil pH and content of CaCO₃ and equivalents relative to altitude

海拔 Altitude (m)	剖面数 Profile number	土样数 Soil number	pH			CaCO ₃ (g kg ⁻¹)		
			最小值	最大值	均值 ± 标准差	最小值	最大值	均值 ± 标准差
			Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
≤1 000	23	102	7.3	10.0	8.6 ± 0.6a	6.5	236.0	78.3 ± 48.9c
1 000 ~ 2 000	98	452	6.7	10.1	8.4 ± 0.6b	1.6	261.2	86.5 ± 54.3b
2 000 ~ 3 000	39	182	7.0	9.1	8.3 ± 0.4b	5.5	232.2	116.1 ± 51.2a
3 000 ~ 4 000	67	292	6.3	9.6	7.9 ± 0.7c	0.5	259.2	65.8 ± 67.1c
>4 000	8	20	6.4	8.6	7.6 ± 0.6d	1.0	258.5	111.9 ± 78.8a

表3 不同土纲pH和CaCO₃含量的描述统计特征

Table 3 Descriptive statistics of soil pH and content of CaCO₃ and equivalents relative to soil order

土纲 Soil Order	剖面数 Profile number	土样数 Soil number	pH			CaCO ₃ (g kg ⁻¹)		
			最小值	最大值	均值 ± 标准差	最小值	最大值	均值 ± 标准差
			Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
有机土 Histosols	1	1	6.4	6.4	6.4 ± 0	0.6	0.6	0.6 ± 0
人为土 Anthrosols	7	34	7.9	8.7	8.3 ± 0.2ab	30.2	234.7	112.2 ± 53.5a
干旱土 Aridisols	72	331	7.2	10.1	8.4 ± 0.6ab	3.9	236.0	96.1 ± 52.6ab
盐成土 Halosols	17	102	7.3	10.1	8.6 ± 0.7a	1.6	229.0	82.3 ± 60.3abc
潜育土 Gleysols	1	3	8.1	8.8	8.5 ± 0.4ab	45.8	161.2	85.4 ± 65.7abc
均腐土 Isohumosols	11	74	6.7	9.6	7.8 ± 0.6c	0.5	259.2	44.0 ± 57.6c
雏形土 Cambisols	82	350	6.3	9.6	8.1 ± 0.6bc	0.6	261.2	92.9 ± 63.7ab
新成土 Primosols	43	146	6.6	9.7	8.2 ± 0.8b	1.1	258.5	63.6 ± 53.3bc

> 耕地 > 草地 > 林地 > 荒地，草地中土壤pH较高的区域，生长着芦苇、梭梭等耐盐植物，植被覆盖度40% ~ 60%。林地中土壤pH较高的区域主要集中在在水边，蒸发较强，Na⁺的含量高，多为碱土；CaCO₃含量由高至低依次为耕地 > 荒地 > 草地 > 其他土地 > 林地，即CaCO₃含量高的土地利用类型pH并非也高。此外，不同土地利用类型下的CaCO₃含量之间差异显著，但CaCO₃含量越高，pH的差异越

不显著。

表5为不同成土母质类型的pH与CaCO₃含量描述统计结果。pH平均值由高至低依次为风积物 > 湖积物 > 洪积-冲积物 > 残积-坡积物 > 冰碛物，而CaCO₃含量由高至低依次为洪积-冲积物 > 残积-坡积物 > 湖积物 > 风积物 > 冰碛物，即CaCO₃含量高的成土母质类型对应的pH并非也高。同时，冰碛物、残积-坡积物和湖积物的CaCO₃含量之间差



表4 不同土地利用pH和CaCO₃含量的描述统计特征

Table 4 Descriptive statistics of soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to land use type								
土地利用 Land use type	剖面数 Profile number	土样数 Soil number	pH			CaCO ₃ (g kg ⁻¹)		
			最小值	最大值	均值 ± 标准差	最小值	最大值	均值 ± 标准差
			Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
草地 Grassland	125	519	6.3	10.1	8.2 ± 0.6bc	0.6	259.2	92.9 ± 64.7ab
耕地 Farmland	20	94	7.7	8.7	8.3 ± 0.2ab	9.3	261.2	109.8 ± 50.6a
荒地 Wasteland	6	37	7.2	8.6	8.1 ± 0.3bc	27.6	167.9	84.6 ± 39.5bc
林地 Woodland	10	87	6.7	10.1	8.1 ± 0.9c	0.5	216.1	39.1 ± 38.3d
其他 ¹⁾ Other land	70	301	6.7	10.1	8.4 ± 0.7a	1.6	246.0	78.3 ± 53.9c

注：1) 主要为戈壁、荒漠 Mainly stands the gobi and desert

表5 不同母质pH和CaCO₃含量的描述统计特征

Table 5 Descriptive statistics of soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to soil parent material								
母质 Parent material	剖面数 Profile number	土样数 Soil number	pH			CaCO ₃ (g kg ⁻¹)		
			最小值	最大值	均值 ± 标准差	最小值	最大值	均值 ± 标准差
			Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD
冰碛物 Till	22	83	6.4	8.6	7.4 ± 0.5e	0.5	258.5	29.4 ± 49.0b
残积-坡积物 Residue-slope wash	62	268	6.3	9.2	8.1 ± 0.6d	0.6	259.2	91.2 ± 65.1ab
风积物 Eolian deposits	7	54	7.6	9.9	8.9 ± 0.6a	8.0	200.0	46.1 ± 40.7c
洪积-冲积物 Alluviao-puluvial	123	544	6.7	10.1	8.3 ± 0.5c	1.6	261.2	96.7 ± 54.6a
湖积物 Lake deposit	21	99	7.3	10.1	8.6 ± 0.7b	1.6	220.9	77.7 ± 57.1b

异不显著，但pH之间表现出显著差异，均表明了pH与CaCO₃含量之间的非线性关系。

2.2 土壤pH和CaCO₃含量的回归模型

从全流域所有样点pH与CaCO₃含量之间的关系（图2）可看出，两者之间确实为非线性关系：土壤pH随着CaCO₃含量的增加而逐渐升高，但当CaCO₃含量升高到某一值后（约30 g kg⁻¹），pH增幅迅速降低，pH最终趋于稳定。全流域和上游土壤pH（y）与CaCO₃含量（x）之间呈极显著正相关，最佳回归模型均是幂函数模型（分

别为 $y=7x^{0.03}$ ， $R^2=0.24^{**}$ ， $F=284.92$ ； $y=7x^{0.04}$ ， $R^2=0.62^{**}$ ， $F=704.00$ ），但是中游和下游pH与CaCO₃含量之间没有相关性，这也表明整个流域pH与CaCO₃含量之间的显著相关性是由上游两者之间显著的相关性决定的。

利用IBM Statistics SPSS 20.0软件中曲线估计功能，分别在不同海拔、土纲、成土母质和土地利用方式下进行pH（y）与CaCO₃含量（x）之间的回归分析，获取的最佳回归模型见表6、表7、表8和表9。

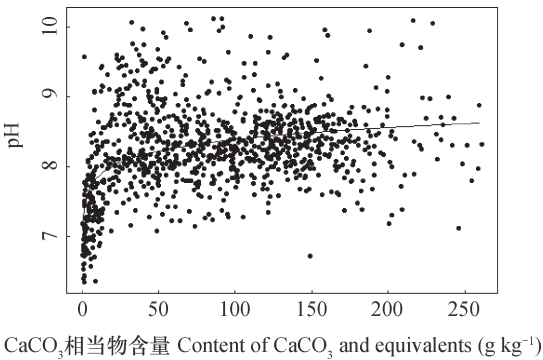


图2 黑河流域土壤pH与CaCO₃含量的关系
Fig. 2 The relationship between soil pH and content of CaCO₃ and equivalents in the Heihe River Valley

表6表明，不同海拔高度区间pH与CaCO₃含量之间均具有显著相关性，海拔<1 000 m，最佳回归模型分别为一元三次回归方程；海拔1 000~2 000 m和2 000~3 000 m，最佳回归模型为一元二次回归方程；海拔3 000~4 000 m和>4 000 m时，最佳回归模型为幂函数模型。

表7表明（由于异常值剔除后，有机土的样品只剩下1个，这里不进行回归分析）。干旱土、潜育土和新成土中，pH与CaCO₃含量之间没有相关性。而人为土、盐成土、均腐土和雏形土四个土纲的pH与CaCO₃含量之间具有显著相关性，其中人为土和盐成土的最佳回归模型为一元三次回归方程，

表6 不同海拔pH和CaCO₃含量的回归模型

Table 6 Regression models for relationship between soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to altitude			
海拔 Altitude (m)	土样数 Soil number	回归模型 Regression model	决定系数 Decisive coefficient R ²
≤1 000	102	$y=8+0.02x+3 \times 10^{-7}x^3$	0.12
1 000 ~ 2 000	452	$y=9-0.005x+1.6 \times 10^{-5}x^2$	0.037
2 000 ~ 3 000	182	$y=8+0.01x-2.7 \times 10^{-5}x^2$	0.27
3 000 ~ 4 000	292	$y=7x^{0.04}$	0.62
>4 000	20	$y=7x^{0.04}$	0.79

表7 不同土纲pH和CaCO₃含量的回归模型

Table 7 Regression models for relationship between soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to soil order			
土纲 Soil order	土样数 Soil number	回归模型 Regression model	决定系数 Decisive coefficient R ²
人为土 Anthrosols	34	$y=8-0.01x-3 \times 10^{-7}x^3$	0.3
盐成土 Halosols	102	$y=8+0.02x+4.9 \times 10^{-7}x^3$	0.1
均腐土 Isohumosols	74	$y=7x^{0.04}$	0.57
雏形土 Cambisols	350	$y=7x^{0.04}$	0.59

均腐土和雏形土的最佳回归模型为幂函数模型。

表8表明，风积物（主要分布在下游）和洪积-冲积物（主要分布在中游和下游）两类成土母质的pH与CaCO₃含量之间没有相关性，而冰碛物（主要分布在上游）、残积-坡积物（主要分布在上游）、湖积物（主要分布在下游）三个成土母质

pH与CaCO₃含量呈极显著相关，最佳回归模型分别为一元三次模型、幂函数模型和线性模型。

表9表明，不同土地利用下pH和CaCO₃含量之间均存在显著的相关性。其中，草地（主要分布在上游）最佳回归模型为幂函数模型，而林地、耕地、荒地、其他土地（主要分布在中游和下游）的

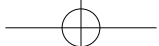


表8 不同母质pH和CaCO₃含量的回归模型

Table 8 Regression models for relationship between soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to parent material			
母质 Parent material	土样数 Soil number	回归模型 Regression model	决定系数 Decisive coefficient R^2
冰碛物 Till	83	$y=7+0.02x-3 \times 10^{-7}x^3$	0.56
残-坡积物 Residue-slope wash	268	$y=7x^{0.04}$	0.58
湖积物 Lake deposit	99	$y=-156.3+27.3x$	0.1

表9 不同土地利用pH和CaCO₃含量的回归模型

Table 9 Regression models for relationship between soil pH and content of CaCO ₃ and equivalents relative to land use type			
土地利用 Land use type	土样数 Soil number	回归模型 Regression model	决定系数 Decisive coefficient R^2
草地 Grassland	519	$y=7x^{0.04}$	0.48
耕地 Farmland	94	$y=8+0.07x-3.25 \times 10^{-5}x^2+4.84 \times 10^{-8}x^3$	0.15
荒地 Wasteland	37	$y=8-0.01x+6.43 \times 10^{-5}x^2$	0.25
林地 Woodland	87	$y=7+0.07x-0.001x^2+2.07 \times 10^{-6}x^3$	0.61
其他土地 Other land	301	$y=9-0.005x+1.36 \times 10^{-5}x^2$	0.05

最佳回归模型分别为一元二次回归模型和一元三次回归模型。

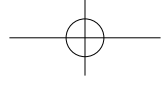
3 讨 论

很多研究表明土壤pH与CaCO₃含量变化的趋势具有较好的一致性^[5, 14-15]，两者之间具有显著的倒数关系。本研究不仅表明黑河流域土壤pH与CaCO₃含量之间总体上也呈现较好的一致性，而且还进一步揭示了不同区域海拔、母质、土壤类型和土地利用方式下，两者之间的不同的相关程度和不同的最佳回归模型。

全流域和上游土壤pH与CaCO₃含量呈显著正相关，但在中游和下游两者相关性不显著。主要是因为黑河流域上游为祁连山区，干旱-半干旱气候，降雨量相对最高，土壤中CaCO₃含量相对较低，这种情况下土壤pH主要受CaCO₃含量影响。而中游主

要是农业区，农田经常性引富含CaCO₃的水灌溉，导致土壤中CaCO₃含量较高，加之经常性的施肥引起土壤酸化^[16]，这均会削弱土壤pH与CaCO₃含量之间的关系。下游土地利用类型主要为戈壁和荒漠，气候干旱，在缺水的自然土壤体系中，OH⁻与溶于水的CO₂的反应足以使在水中溶解性不高的CaCO₃沉淀积累^[17]，此外一部分钙可能转化为石膏形式，这也会削弱CaCO₃含量与土壤pH之间的关系。另有研究表明，在干旱地区，植物有机残体分解产生的碳可参与土壤CaCO₃的形成^[18]，许多微生物也会通过分解有机质释放CaCO₃^[19]，这也会增加土壤中CaCO₃含量，进而影响到土壤pH与CaCO₃含量之间的关系。

黑河流域土壤pH随着海拔高度的增加而递减，这与王瑞勇等^[20]对不同海拔高度高寒草地土壤理化性质的研究结果一致。但本研究发现CaCO₃含量随海拔的变化趋势比较复杂，这是由于土样多



集中在海拔介于1 000~2 000 m的中下游地区,这一地区降雨量、有机质含量、土地利用方式、成土母质和土壤类型差异较大,在一定程度上导致CaCO₃含量对pH的影响复杂化^[21]。

从土壤类型来看,干旱土具有独特的生物气候条件,由于气候干热,植被稀少,干旱土腐殖质积累作用微弱^[22]。气候越干旱,碳酸钙的表聚作用越明显。因此干旱土CaCO₃含量极高,但是由于碳酸钙的水解作用不强,土壤pH并不会很高,两者的相关性减弱。潜育土形成过程深受水文地质条件影响,局部土体周期性的积水,土壤交替进行草甸化和沼泽化过程,但温暖的气候条件促进有机质快速分解,土壤有机质含量不高,碳酸盐发生垂直迁移和侧向汇积,易形成石灰结核,甚至形成石灰磐。在这种情况下,土壤pH与CaCO₃含量的相关性也不高。新成土是一种年轻的土壤,土壤基本保持着土壤母质的特性。黑河流域新成土的成土母质多为风积黄土或具有黄土性物质的洪积-冲积物,因此土壤CaCO₃含量较高,但pH的变化波动较大,也降低了两者的相关性。

不同土地利用方式下pH与CaCO₃含量之间均具有显著的相关性,只是最佳回归模型不同,说明土地利用对两者之间的相关性影响甚小,但会影响最佳回归模型。

本研究虽然再次证明了以往研究揭示的pH随着CaCO₃含量增加的变化趋势,但得出的pH与CaCO₃含量之间最佳回归模型呈多样化^[23],表现为幂函数模型、一元三次模型、一元二次模型和线性模型,这不同于刘世全等^[7]得出的单一倒数模型,可能与采用的统计分析软件中模型的多样性有关,也可能与研究区域成土因素和土壤类型复杂程度有关。总体来看,黑河流域空间跨度大,海拔梯度大、成土因素和土壤类型更为复杂,pH与CaCO₃含量之间的最佳回归模型多样化应该是合理的。

4 结 论

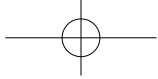
研究表明,黑河流域上游土壤pH与CaCO₃含量呈显著正相关,不同的海拔高度区间pH与CaCO₃含量之间均具显著相关性,人为土、盐成土、均腐土、锥形土的pH与CaCO₃含量显著正相关,冰碛物、残积-坡积物、湖积物发育的土壤pH与CaCO₃含量具有极显著相关性,土地利用方式对pH与

CaCO₃含量的关系影响较小,pH与CaCO₃含量的最佳回归模型呈现多样性,有幂函数模型、一元二次模型、一元三次模型、线性模型,并非以往研究得出的单一倒数模型。本文中区域、海拔、母质、土壤类型、成土母质的pH与CaCO₃含量之间关系尚基于单因素分析,多因素分析有待后续的工作中进行。

参 考 文 献

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000
Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1993
National Soil Survey Office. Soil of China (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1993
- [3] 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
- [4] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 第2版. 北京: 科学出版社, 1990
Xiong Y, Li Q K. Soil of China (In Chinese). 2nd ed. Beijing: Science Press, 1990
- [5] 朱礼学, 邓泽锦. 土壤pH及CaCO₃在多目标地球化学调查中的研究意义. 物探化探计算技术, 2001, 23 (2): 140—143
Zhu L X, Deng Z J. A study of the multi-aim geochemistry agrology survey (In Chinese). Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 23 (2): 140—143
- [6] 于天仁. 土壤化学原理. 北京: 科学出版社, 1987
Yu T R. Principle of soil chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987
- [7] 刘世全, 张世熔, 伍均, 等. 土壤pH与碳酸钙含量的关系. 土壤, 2002, 34 (5): 279—283
Liu S Q, Zhang S R, Wu J, et al. Relation between pH and CaCO₃ in soil (In Chinese). Soils, 2002, 34 (5): 279—283
- [8] 贺婧, 赵亚平, 关连珠. 土壤中游离碳酸钙对土壤pH及酶活性的影响. 沈阳农业大学学报, 2011, 42 (5): 614—617

- He J, Zhao Y P, Guan L Z. Effect of free calcium carbonate on soil pH and enzyme activities (In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011, 42 (5): 614—617
- [9] Yang F, Zhang G L, Yang J L, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086—3093
- [10] Cheng G D, Li X, Zhao W Z, et al. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *National Science Review*, 2014, 1: 413—428
- [11] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析. *地理学报*, 2014, 69 (3): 365—377
- Huai B J, Li Z Q, Sun M P, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69 (3): 365—377
- [12] 宁宝英, 张志强, 何元庆. 基于文献统计的黑河流域研究重点和热点学科演变分析. *冰川冻土*, 2013, 35 (2): 504—512
- Ning B Y, Zhang Z Q, He Y Q. Development of the research emphasis and main disciplines about the Heihe River Basin reviewed through bibliometric analysis (In Chinese). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35 (2): 504—512
- [13] 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
- [14] 朱宏, 赵成义, 李军, 等. 土壤CaCO₃淀积对降水量及环境变化的指示. *土壤通报*, 2007, 38 (4): 810—812
- Zhu H, Zhao C Y, Li J, et al. Indication of soil CaCO₃ sedimentation to rainfall and environmental change (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (4): 810—812
- [15] 杨黎芳, 李贵桐, 林启美, 等. 栗钙土不同土地利用方式下土壤活性碳酸钙. *生态环境学报*, 2010, 19 (2): 428—432
- Yang L F, Li G T, Lin Q M, et al. Active carbonate of chestnut soils in different lands (In Chinese). *Ecology and Environmental Science*, 2010, 19 (2): 428—432
- [16] 朱小琴, 孙维侠, 黄标, 等. 长江三角洲城乡交错区农业土壤pH特征及影响因素探讨——以江苏省无锡市为例. *土壤学报*, 2009, 46 (4): 594—602
- Zhu X Q, Sun W X, Huang B, et al. pH characters of agricultural soil in peri-urban areas of the Yangtze River Delta region and their affecting factors—A case study of Wuxi City, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (4): 594—602
- [17] 李学恒. 土壤化学. 北京: 高等教育出版社, 2001
- Li X H. Soil chemistry (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001
- [18] 张宁, 何兴东, 邬畏. 腾格里沙漠3种土壤有机质和碳酸钙特征. *生态学报*, 2009, 29 (8): 4094—4101
- Zhang N, He X D, Wu W. Studies on the characteristics of soil organic matter and pedogenic calcium carbonate for three kinds of soil in the Tengri Desert (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (8): 4094—4101
- [19] Monger H C, Daugherty L A, Lindemann W C. Microbial precipitation of pedogenic calcite. *Geology*, 1991, 19: 997—1000
- [20] 王瑞永, 刘莎莎, 王成章, 等. 不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析. *草地学报*, 2009, 17 (5): 621—628
- Wang R Y, Liu S S, Wang C Z, et al. Analysis on soil physicochemical indices at different altitudes in Alpine Rangeland (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17 (5): 621—628
- [21] 张维, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵区土壤pH空间变异及影响因素分析——以四川仁寿县为例. *长江流域资源与环境*, 2015, 24 (7): 1193—1199
- Zhang W, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil pH and its influence factors at a county scale in hilly area of mid-Sichuan basin—A case study from Renshou in Sichuan (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24 (7): 1193—1199
- [22] 龚子同, 雷文进, 陈鸿昭. 中国的干旱土. *干旱区研究*, 1988 (2): 1—9
- Gong Z T, Lei W J, Chen H Z. Arid soil in China (In Chinese). *Arid Zone Research*, 1988 (2): 1—9
- [23] 段建南, 李保国, 石元春, 等. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟. *土壤学报*, 1999, 36 (3): 318—326
- Duan J N, Li B G, Shi Y C, et al. Modeling of soil CaCO₃ deposition process in arid areas (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36 (3): 318—326



Relationships between pH and Content of Calcium Carbonate and Equivalents in Soil of the Heihe River Valley, Northwest China

LIN Ka^{1, 2} LI Decheng^{1†} ZHANG Ganlin¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】Content of calcium carbonate and equivalents and pH are two important properties of the soil, which will affect availabilities of soil elements and nutrients, and consequently soil fertility and quality. It was demonstrated in previous studies that content of CaCO₃ and equivalents did affect soil pH and some other soil properties. Generally speaking, with increasing content of CaCO₃ and equivalents, soil pH gradually rises and levels off in the end. What's more, their relationship could be described with an inverse function model. This study was carried out in the Heihe River Valley, which is the second largest inland river valley and a typical one, located in the western part of the Hexi Corridor in the arid region of Northwest China. In this area, the relationship between soil pH and content of CaCO₃ and equivalents may vary and was therefore analyzed from the aspects of region, altitude, soil parent material, soil type and land use. 【Method】Based on the data gathered during the 2012—2013 soil survey of the valley, correlation analysis and regression analysis were performed of variation of soil pH with content of content of CaCO₃ and equivalents. 【Result】Results show that soil pH had a significant nonlinear relation with content of CaCO₃ and equivalents as previous studies disclosed, i.e., soil pH gradually rises with the increasing content of the substance, declined in its rising rate when the content reached a certain level, and leveled off in the end. However, the relationship between the two varied in degree with region, altitude, soil parent material, soil type and land. Specifically, soil pH was significantly and positively related to content of CaCO₃ and equivalents in the valley as a whole and in the upstreams of the river, and in anthrosols, halosols, isohumosols and cambisols, regardless of elevation and land use. However, no significant relationship was found in soils derived from aeolian, diluvial and alluvial deposits. In addition, the optimal regression model for analysis of relationship between the two varied with the region, altitude, soil parent material, soil type and land use, and may be a power function model, a quadratic model, a cubic model or a linear model, instead of a simple inverse function model as obtained in previous studies. 【Conclusion】The relationship between soil pH and content of CaCO₃ and equivalents in the Heihe River Valley is complex, which may be related to its vast spatial span, great altitude gradient, different soil forming factors and diversified soil types.

Key words Soil pH; CaCO₃ and equivalents; Heihe River Valley

(责任编辑：檀满枝)