

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.03.007

# 陕西渭河中下游流域黏土矿物分布特征分析

王鹏,刘拓,赵禹,段星星,梁楠,杨生飞,白金

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,陕西 西安 710054)

**摘要:**利用土地质量地球化学调查的 7 种氧化物数据,对陕西渭河中下游流域内的黏土矿物进行能谱分析,建立了质量守恒方程组,将求解黏土矿物含量问题转化为求解线性规划最优解,以研究黏土矿物分布特征。结果显示:该方法简单易行,准确性较高;土壤发育处于幼年—中间阶段,主要黏土矿物是伊利石、蒙脱石、高岭石,次要黏土矿物为蛭石、绿泥石,其含量因地貌类型而不同,体现不同的风化过程。其中,渭北台塬以黑云母-绿泥石-蛭石为主;中低山区以长石-伊利石-蒙脱石-高岭石为主;秦岭北缘由 2 种风化过程共同作用而成;河谷区域则是 2 种风化过程均较弱。此外,黏土矿物分布特征还综合反映了土壤类型及其性质,标识了不同地史时期的冷干和暖湿古气候的交替变化。

**关键词:**土地质量地球化学调查;黏土矿物;氧化物;分布特征

中图分类号:P596

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)03-0070-11

## Analysis on the Distribution Characteristics of Clay Minerals in the Middle and Lower Reaches of Weihe River in Shaanxi Province

WANG Peng, LIU Tuo, ZHAO Yu, DUAN Xingxing, LIANG Nan, YANG Shengfei, BAI Jin

(Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** In this paper, the energy spectrum analysis of clay minerals in the middle and lower reaches of Weihe River in Shaanxi Province has been carried out by using 7 kinds of oxide data from the investigation of land quality geochemistry. And then, a set of quality conservation equations has been established, which transformed the problem of solving clay mineral content into solving the optimal solution of linear programming to study the distribution of clay minerals. The results show that this method is simple and accurate. Soil development is still at a relatively early stage. The main viscous minerals are illite, montmorillonite, kaolinite, while the secondary clay minerals are vermiculite and chlorite. The different type of landform cause the difference in clay mineral content, reflecting the different weathering processes. For example, the Weibei platform is dominated by biotite, chlorite and vermiculite. The middle and low mountainous areas are dominated by feldspar, mica, illite, montmorillonite and kaolin. The northern margin of the Qinling Mountains is composed of two weathering processes, while the valley area is weak in both weath-

收稿日期:2019-01-15;修回日期:2019-04-18

基金项目:中国地质调查局基础地质调查项目“西北五省耕地区 1:25 万土地质量地球化学调查”(DD20160319)、“新疆耕地区土地质量地球化学调查”(DD20190521)联合资助

作者简介:王鹏(1986-),男,河南杞县人,硕士,工程师,从事土地质量地球化学调查方面的研究。E-mail:331559202@qq.com

ering processes. In addition, the distribution characteristics of clay minerals also reflect the soil type and its nature, indicating the alternating changes of cold dry and warm ancient climate in different geological times.

**Keywords:** land quality geochemical survey; clay minerals; oxide; distribution characteristics; influence factors

土壤矿物是土壤物质组成的主体,构成了土壤的“骨骼”,是土壤微量元素的主要来源(李老虎,2003)。按成因分为原生矿物和次生矿物(黏土矿物),而黏土矿物是土壤矿物中最活跃的组分,具有高分散性和高物理化学活性,是母岩风化的直接产物,其形成演化受黄土形成和赋存环境的影响(齐雁冰,2015;鲁春霞,1997)。因此,研究土壤黏土矿物的组成、结构和性质,对鉴定土壤类型、识别土壤形成的过程、揭示黄土形成演化的表生地球化学环境、追索黄土的物质来源具有重要意义(张永双,2004)。

目前,土壤黏土矿物含量测定方法非常成熟,已经由 X-射线衍射、差热分析法、电子探针、化学分析等单方法(陈俊卿,1982)演变为组合方法的应用(徐速,2012),提高了土壤黏土矿物测定的准确率。多位学者也用上述方法测定了陕西渭河中下游流域内单点位置的土壤黏土矿物含量。例如,长安区(赵景波,2000)、太白山北坡(陈俊卿,1982)、秦岭北缘(张永双,2004)、咸阳淳化(张青青,2018)、眉县、武功(徐明岗,1989)等;分析了黏土矿物特征。但尚未有学者对整个渭河中下游流域的土壤黏土矿物含量特征进行研究,况且由于土壤风化不彻底,原生矿物颗粒的裂隙和解理面含有黏土矿物(郝立波,2006),给黏土矿物准确测定带来困难。

因此,笔者尝试采用线性规划求最优解模型,利用海量土地质量地球化学调查的 7 种氧化物数据,识别陕西渭河中下游流域的矿物种类和含量,并对黏土矿物组合和分布特征进行研究,甄别古环境气候条件。

1 基本原理

笔者采用线性规划标准型下所示,求满足等式约束条件和不等式约束条件(2)的  $n$  维向量  $x$ ,使其目标函数(1)的最小值。

Minz=C×X (1)

$$\begin{cases} AX=b \\ lb\geqslant 0 \\ ub\geqslant 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:C—— $n$  维行向量;  
A—— $m \times n$  维矩阵;  
B—— $m$  维列向量;  
lb、ub—— $n$  维列向量;  
 $x$ —— $n$  维行向量。

国内学者普遍认为陕西渭河中下游流域的土壤矿物主要有方解石、铁锰结合体、石英、钙长石、钾长石、钠长石、黑云母、伊利石、蛭石、绿泥石、高岭石、蒙脱石(郝立波,1990;贾相岳,2013;郑洪汉,1994;赵文涛,2009;孙一博,2016),含量大于 0。且从理论上讲,土壤中  $n$  种土壤矿物中的某种氧化物含量等于氧化物含量。但由于土壤是个复杂体,模拟值和真实间存在偏量(正偏量和负偏量)。因此,将求解  $n$  种土壤矿物含量的问题转化为求取偏量绝对值之和最小时的  $n$  种矿物含量的线性规划模型。

模型以及模型中的 C、A、b、lb、ub 参数的含义确定如下。

$$\text{Min}z = \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i) \quad (3)$$

$$A_{11} W_1 + A_{12} W_2 + \cdots + A_{1n} W_n + \alpha_1 - \beta_1 = b_1 \quad (4)$$

$$A_{21} W_1 + A_{22} W_2 + \cdots + A_{2n} W_n + \alpha_2 - \beta_2 = b_2 \quad (5)$$

.....

$$A_{m1} W_1 + A_{m2} W_2 + \cdots + A_{mn} W_n + \alpha_m - \beta_m = b_m \quad (6)$$

$$W_1, W_2, \cdots, W_n \geqslant 0 \quad (7)$$

$$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m \geqslant 0 \quad (8)$$

$$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m \geqslant 0 \quad (9)$$

式中: $z$ ——偏量之和;  
N——土壤中的矿物数量;  
M——土壤中的氧化物数量;  
 $W_n$ ——土壤中第  $n$  种矿物的含量;  
 $b_m$ ——土壤中第  $m$  种氧化物的含量;

$\alpha_m$  —— 土壤中第  $m$  种氧化物含量的负偏量;  
 $\beta_m$  —— 土壤中第  $m$  种氧化物含量的正偏量;  
 $A_{nm}$  —— 第  $m$  种氧化物在第  $n$  种矿物的氧化物含量矩阵。

其中,方解石、铁锰胶体、石英、钙长石、钠长石和钾长石等成分简单的矿物可采用理论计算值,黑

云母、高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、蛭石、角闪石、辉石等成分复杂矿物可采用平均化学成分(B. A. 柯达夫,1981; 郝立波,1990; 梁树能,2014)。笔者选择  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  作为计算用的氧化物,采用的矿物氧化物含量矩阵见表 1。

表 1 土壤中矿物氧化物含量矩阵表  
Tab. 1 The matrix of oxide composition of the minerals in soil

| 矿物   | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{MgO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ |
|------|----------------|-------------------------|--------------|-----------------------|----------------------|--------------|-------------------------|
| 方解石  | 0              | 0                       | 0.54         | 0                     | 0                    | 0            | 0                       |
| 铁锰胶体 | 0              | 0                       | 0            | 0                     | 0                    | 0            | 0.69                    |
| 石英   | 1              | 0                       | 0            | 0                     | 0                    | 0            | 0                       |
| 钙长石  | 0.432          | 0.367                   | 0.165        | 0.025                 | 0.01                 | 0            | 0                       |
| 钠长石  | 0.688          | 0.194                   | 0.015        | 0.083                 | 0.02                 | 0            | 0                       |
| 钾长石  | 0.652 2        | 0.181 1                 | 0.005        | 0.045                 | 0.116 7              | 0            | 0                       |
| 黑云母  | 0.358 8        | 0.161                   | 0.007 9      | 0.014 4               | 0.083                | 0.102 9      | 0.101 4                 |
| 高岭石  | 0.324 4        | 0.385 2                 | 0.000 8      | 0.006 6               | 0.001 4              | 0.000 8      | 0.000 8                 |
| 伊利石  | 0.542 6        | 0.289 7                 | 0.006 7      | 0.001 3               | 0.074 7              | 0.013 2      | 0.028 4                 |
| 蒙脱石  | 0.431 4        | 0.197 6                 | 0.016 2      | 0.000 4               | 0.001 1              | 0.032 2      | 0.008 3                 |
| 绿泥石  | 0.267 7        | 0.197 0                 | 0.001 2      | 0.001 1               | 0                    | 0.149 23     | 0.246 8                 |
| 蛭石   | 0.385 9        | 0.108 5                 | 0.022 6      | 0.001 9               | 0.010 8              | 0.215 8      | 0.087 6                 |
| 白云石  | 0              | 0                       | 0.304        | 0                     | 0                    | 0.217        | 0                       |
| 角闪石  | 0.48           | 0.063                   | 0.129        | 0.017                 | 0                    | 0.148        | 0.145                   |
| 辉石   | 0.458          | 0.098 6                 | 0.21         | 0                     | 0                    | 0.18         | 0.052                   |

2 土壤黏土矿物含量计算

2.1 研究区域

笔者研究区域为陕西境内的渭河中下游流域, 流长 502.4 km,流域面积 6.7 万  $\text{km}^2$ ,占流域总面积的 50%。渭河两岸地形波状起伏,自西向东地势逐渐变缓,河谷变宽而浅。流域北部为黄土高原,南部为秦岭山区,地貌主要有黄土丘陵区、黄土塬区、黄土梁、中低山区、关中平原区等(图 1)。属于暖温带温和半湿润气候区,年平均气温为  $12\sim14^\circ\text{C}$ ,年降水量为 500~900 mm。降水量年际变化大,夏秋多雨,以 7 月、8 月、9 月最多,4~9 月降水量占年降水量的 77.0%。主要土壤类型为褐土、黄绵土、黑垆土、潮土、冲积土等。主要土地利用类型为耕地,

约占 50%,其次是林地和草地、园地。土壤质地为黏黄土。

2.2 数据来源

采用西安、宝鸡、渭南、咸阳、铜川区域内的生态地球化学调查(多目标区域地球化学调查和土地质量地球化学调查)的 7 种氧化物含量数据,共计 10 214组。单点采样密度 1 个点/ $1\text{ km}^2$ ,组合样密度 1 个点/ $4\text{ km}^2$ ,单样点按梅花法分为 3~5 个点。遵从代表性、均匀性、合理性和多点混合的原则,采用常规采样法取 0~20 cm 土层的土样,每个样品 1 000 g 左右。同时,在采样时避开粪堆、新近堆积土等点状污染物。土壤样品去掉植物根系和岩石碎块。自然风干后,过 20 目尼龙筛。由自然资源部安徽地质测试实验室进行测试, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$  采用 X 荧光光谱法(XRF)分析,  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  采

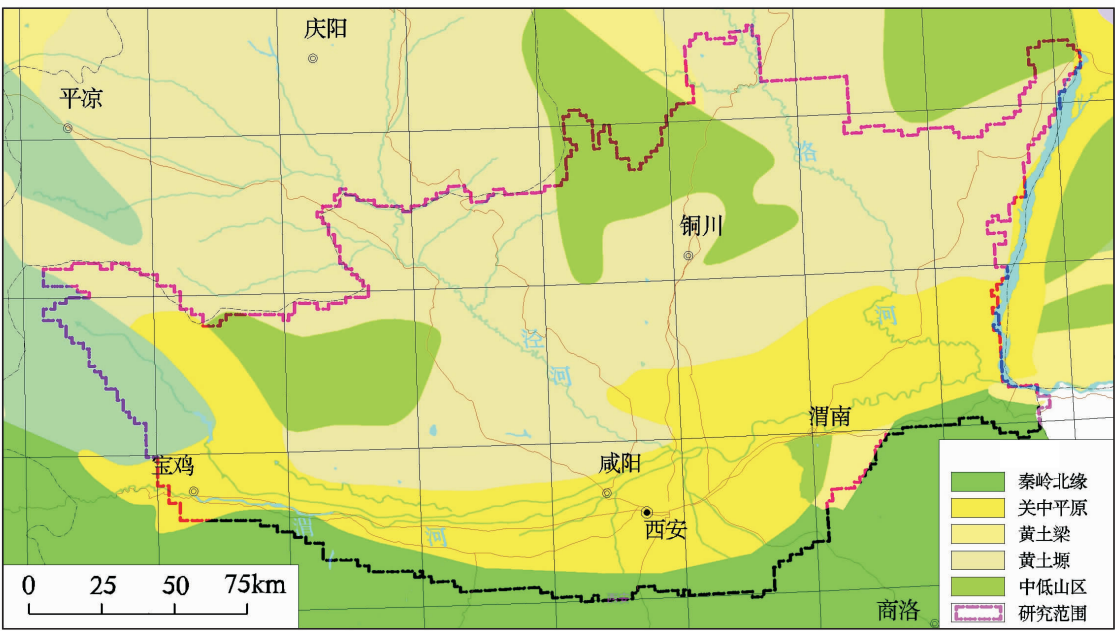


图 1 研究区域地貌景观图

Fig. 1 The landscape of the study area

用等离子体光谱法(ICP - AES)分析。分析质量符合地质矿产实验室测试质量管理规范 DZ0130 - 1 - 2006 要求。

选取的计算结果验证数据为收集张永双(2004)

和端木合顺(2006)在渭河中下游流域铜川、泾阳、周至等区域内土壤黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石、蛭石)的 X - 射线衍射含量数据,共计 9 组(表 2)。

表 2 X - 射线衍射的土壤主要矿物含量表(%)  
Tab. 2 The statistics on the main minerals in the soil(%)

| 方法         | 矿物  | 铜川     | 耀县     | 泾阳     | 长安     | 户县     | 西安     | 宜君县    | 临潼     | 周至      |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| X - 射线衍射结果 | 蒙脱石 | 4. 22  | 4. 912 | 5. 504 | 5. 664 | 6. 06  | 3. 464 | 4. 004 | 5. 788 | 10. 184 |
|            | 伊利石 | 6. 3   | 6. 016 | 5. 682 | 6. 212 | 6. 46  | 4. 112 | 5. 602 | 6. 314 | 12. 422 |
|            | 高岭石 | 3. 665 | 4. 574 | 5. 108 | 4. 878 | 6. 385 | 3. 228 | 3. 943 | 5. 141 | 9. 728  |
|            | 绿泥石 | 1. 895 | 2. 298 | 1. 966 | 3. 106 | 3. 115 | 1. 746 | 2. 091 | 2. 687 | 2. 546  |
|            | 蛭石  | 0. 67  | 0. 89  | 1. 37  | 1. 26  | 1. 6   |        |        |        |         |
|            | 合计  | 16. 75 | 18. 69 | 19. 63 | 21. 12 | 23. 62 | 12. 55 | 15. 64 | 19. 93 | 34. 88  |
| 计算结果       | 蒙脱石 | 5. 15  | 6. 23  | 6      | 7      | 7      | 5      | 6      | 6      | 6       |
|            | 伊利石 | 5. 27  | 5. 57  | 6. 82  | 7. 75  | 7. 76  | 6. 02  | 7. 7   | 8. 51  | 7. 7    |
|            | 高岭石 | 4. 7   | 5      | 5      | 6. 1   | 6. 8   | 5      | 7. 5   | 5. 5   | 6. 1    |
|            | 绿泥石 | 2. 23  | 2. 31  | 2. 47  | 2. 15  | 2. 47  | 2. 15  | 1. 77  | 2. 01  | 2. 64   |
|            | 蛭石  | 1. 12  | 1. 29  | 1. 68  | 1. 29  | 1. 54  | 1. 29  | 0. 9   | 1. 12  | 1. 54   |
|            | 合计  | 18. 32 | 20. 17 | 21. 97 | 24. 24 | 25. 51 | 19. 46 | 23. 87 | 23. 14 | 23. 98  |

注:X - 射线衍射结果数据来源于张永双、端木合顺的研究。

2.3 土壤矿物含量计算

采用 MATLAB 中的 Linprog 函数中的单纯形法(刘浩, 2016), 利用  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等 7 种氧化物数据, 计算符合偏差绝对值总和最小的各类土壤矿物含量。并绘制黏土矿物的地球化学图, 插值出 X-射线衍射样品位置的各黏土矿物含量见表 2。

计算结果表明, 该方法的精度很高, 总体偏差均小于  $1.0\text{E}-09$ 。识别出黏土矿物类型为高岭石、伊利石、蒙脱石、蛭石、绿泥石, 与实际情况完全符合。

与 X-射线衍射定量分析结果对比表明, 计算结果较 X-射线衍射定量分析的黏土矿物含量要高。主要是由于黏土矿物中以伊利石为主, 风化成

壤作用弱, 部分黏土矿物存在于原生矿物颗粒的裂隙和解理面上, 无法被 X-射线衍射识别出来(郝立波, 2006), 而是作为原生矿物计量。而单纯形法依据土壤样品的化学成分, 不存在上述问题, 其结果是样品中各种存在状态的黏土矿物总量。

从频率(图 2)中可以看出原生矿物(方解石、铁锰胶体、石英、钙长石、钠长石、钾长石、黑云母、角闪石、辉石)含量约占土壤的 75.53%, 黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、蛭石)含量约占 22.72%, 且 97.66% 黏土矿物含量为 15%~35%, 与黄春长(1997)等人关于土壤中生物风化或淋溶淀积形成的胶粒( $<0.001\text{ mm}$ )含量比例研究成果一致。

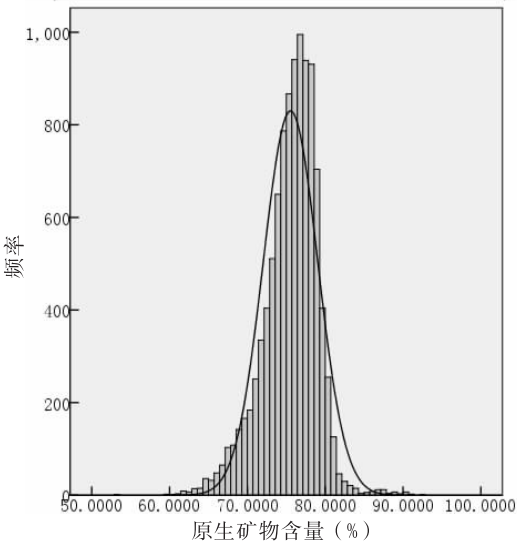
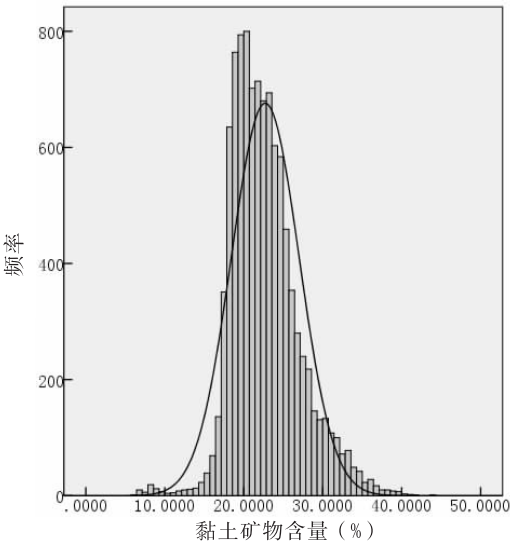


图 2 原生矿物与黏土矿物含量频率图

Fig. 2 The Content of primary and clay minerals

综上所述, 利用最优化方法计算黏土矿物含量的方法是可行的, 其影响因素少, 简单易行, 得出结果具有较高的精度, 可以用于土壤黏土矿物的研究。

3 土壤矿物分布特征

3.1 土壤矿物含量统计分析

采用 SPSS19.0 软件对计算出的原生矿物、黏土矿物以及各矿物含量进行统计分析, 得出偏度、峰度和变异系数等统计量指标(表 3)。

黏土矿物为高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石、蛭石。

从表 3 中可以得出, 伊利石、高岭石、蒙脱石的均值较高, 为主要黏土矿物; 而绿泥石、蛭石的均值较小, 为次要黏土矿物。

原生矿物和黏土矿物的峰度(1.711, 1.418)、偏度(-0.565, 0.662)均较小, 且两者峰度和偏度值基本一致。而黏土矿物的变异系数(18.93%)较原生矿物的变异系数(4.65%)大, 表明黏土矿物的风化差异较大, 存在较多高值异常区域。

方解石的变异系数(48.19%)最大, 极大值(28.13)为极小值(0.19)的 150 倍。说明数据差异大, 方解石极易分化, 为弱稳定矿物。而石英与之相反, 变异系数(8.60%)最小, 抗风化能力强, 极稳定。

表 3 土壤中主要矿物的统计量表  
Tab. 3 The statistics on the main minerals in the soil

| 矿物    | 极小值<br>(%) | 极大值<br>(%) | 均值<br>(%) | 标准差  | 方差    | 偏度     | 峰度    | 变异系数<br>(%) |
|-------|------------|------------|-----------|------|-------|--------|-------|-------------|
| 方解石   | 0.19       | 28.13      | 7.18      | 3.46 | 12.00 | −0.15  | −0.06 | 48.19       |
| 铁锰结合体 | 1.37       | 8.99       | 4.60      | 0.67 | 0.46  | −0.12  | 2.53  | 14.57       |
| 石英    | 13.47      | 49.48      | 29.77     | 2.56 | 6.57  | 1.66   | 9.72  | 8.60        |
| 钙长石   | 0.74       | 6.91       | 4.56      | 0.94 | 0.88  | −1.61  | 2.88  | 20.61       |
| 钠长石   | 2.01       | 24.30      | 9.16      | 2.57 | 6.63  | 0.53   | 1.43  | 28.06       |
| 钾长石   | 1.75       | 18.82      | 11.77     | 1.18 | 1.40  | 0.03   | 2.60  | 10.03       |
| 黑云母   | 0.60       | 5.98       | 3.19      | 0.49 | 0.24  | 0.06   | 2.28  | 15.36       |
| 高岭石   | 1.13       | 20.34      | 6.00      | 1.65 | 2.74  | 1.44   | 3.91  | 27.50       |
| 伊利石   | 2.05       | 23.96      | 6.80      | 1.91 | 3.65  | 1.83   | 6.80  | 28.09       |
| 蒙脱石   | 1.75       | 9.38       | 6.31      | 0.94 | 0.88  | 0.00   | 1.26  | 14.90       |
| 绿泥石   | 0.39       | 4.33       | 2.27      | 0.31 | 0.09  | 0.21   | 8.16  | 13.66       |
| 蛭石    | 0.00       | 3.48       | 1.34      | 0.26 | 0.07  | 0.36   | 3.90  | 19.40       |
| 白云石   | 0.16       | 7.18       | 1.25      | 0.34 | 0.11  | 0.27   | 9.77  | 27.20       |
| 角闪石   | 0.39       | 8.13       | 2.20      | 0.46 | 0.21  | −0.55  | 4.28  | 20.91       |
| 辉石    | 0.37       | 6.14       | 1.85      | 0.36 | 0.13  | −1.09  | 5.32  | 19.46       |
| 原生矿物  | 53.29      | 92.38      | 75.54     | 3.51 | 12.28 | −0.565 | 1.711 | 4.65        |
| 黏土矿物  | 5.85       | 43.79      | 22.71     | 4.30 | 18.52 | 0.662  | 1.418 | 18.93       |

注:原生矿物为方解石、铁锰胶体、石英、钙长石、钠长石、钾长石、黑云母、角闪石、辉石。

石英、高岭石、伊利石的峰度值(9.72, 3.91, 6.80)较大,表明数据比较集中于平均值(29.77, 6.00, 6.80),其偏度值(1.66, 1.44, 1.83)较大,右偏数量较多,表明异常高值区较多。

钙长石、角闪石、辉石的峰度值(2.88, 4.28, 5.32)较大,表明数据比较集中于平均值(4.56, 2.20, 1.85),但是偏度值(−1.61, −0.55, −1.09)较小,左偏数量较多,表明异常低值区较多。

绿泥石、蛭石峰度值(8.16, 3.90)较大,平均值为 2.27、1.34,但是偏度值为 0.21、0.36,蛭石、绿泥石极小值为 0、0.39,表明蛭石、绿泥石的成土作用很弱。

3.2 土壤矿物间相关关系分析

目前,已有多名学者对土壤黏土矿物形成进行了研究,普遍认为黏土矿物分化依次为云母—伊利石—蛭石—蒙脱石—铝蛭石—高岭石—三水铝石,从左至右风化程度渐次提高,Si、K、Na 等元素淋失,Al、Fe 富集(JACKSION, 1962)。影响土壤矿

物风化成壤的因素很多,各矿物之间存在复杂的联系,彼此之间既独立又相互联系,携带着古气候环境变化的信息(孙庆峰, 2011),共同影响着土壤属性和肥力特征(表 4)。

黏土矿物中的高岭石、伊利石、蒙脱石之间的相关系数(表 4)分别 0.743、0.802、0.815,为强正相关;蛭石、绿泥石之间相关系数为 0.779,为强正相关;但高岭石、伊利石、蒙脱石与蛭石、绿泥石之间的最大相关系数为 0.209,为弱相关。表明主次要黏土矿物间相关关系弱,具有不同的成壤过程。

伊利石与钙长石、钠长石、角闪石的相关系数为 −0.48, −0.68, −0.5,为强负相关,表明伊利石主要是由于土壤中的长石、云母、角闪石和辉石等原生矿物中的 K 元素从晶体构造中丧失,同时水分子进入晶格,导致硅氧片中的硅酸铝有相对增加,从而形成半坚硬晶格的硅酸盐矿物。

绿泥石和黑云母的相关系数为 0.795,具有较强的正相关关系,而与长石(钙长石、钠长石,钾长

表 4 土壤中主要矿物间的相关关系表  
Tab. 4 The Correlation between major minerals in soil

| 矿物    | 方解石   | 铁锰结合体 | 石英    | 钙长石   | 钠长石   | 钾长石   | 黑云母   | 高岭石   | 伊利石   | 蒙脱石   | 绿泥石   | 蛭石    | 白云石   | 角闪石   | 辉石 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 方解石   | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 铁锰结合体 | −0.57 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 石英    | −0.67 | 0.034 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 钙长石   | 0.782 | −0.41 | −0.58 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 钠长石   | −0.14 | −0.32 | 0.217 | −0.01 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 钾长石   | −0.47 | 0.047 | 0.292 | −0.5  | −0.03 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 黑云母   | 0.439 | −0.18 | −0.58 | 0.105 | −0.41 | 0.019 | 1     |       |       |       |       |       |       |       |    |
| 高岭石   | −0.67 | 0.842 | 0.292 | −0.63 | −0.32 | 0.097 | −0.21 | 1     |       |       |       |       |       |       |    |
| 伊利石   | −0.45 | 0.723 | 0.138 | −0.48 | −0.68 | 0.093 | −0.02 | 0.743 | 1     |       |       |       |       |       |    |
| 蒙脱石   | −0.53 | 0.839 | 0.066 | −0.34 | −0.55 | 0.032 | −0.11 | 0.802 | 0.815 | 1     |       |       |       |       |    |
| 绿泥石   | 0.045 | 0.192 | −0.36 | −0.25 | −0.31 | 0.068 | 0.795 | 0.197 | 0.147 | 0.192 | 1     |       |       |       |    |
| 蛭石    | −0.11 | 0.152 | −0.29 | 0.32  | −0.29 | 0.308 | 0.715 | 0.141 | 0.179 | 0.209 | 0.779 | 1     |       |       |    |
| 白云石   | 0.461 | −0.27 | −0.57 | 0.391 | −0.33 | 0.058 | 0.587 | −0.43 | −0.12 | −0.13 | 0.206 | 0.375 | 1     |       |    |
| 角闪石   | 0.604 | −0.55 | −0.62 | 0.559 | 0.059 | −0.12 | 0.536 | −0.73 | −0.5  | −0.46 | 0.162 | 0.22  | 0.697 | 1     |    |
| 辉石    | 0.404 | −0.29 | −0.57 | 0.477 | −0.21 | 0.058 | 0.445 | −0.51 | −0.21 | −0.12 | 0.051 | 0.322 | 0.809 | 0.839 | 1  |

石)、角闪石和辉石的相关系数分别为 0.25、0.31、0.068、0.162、0.051,相关关系弱,表明绿泥石是由富 Mg 和富 Fe 的黑云母通过某些 Mg、K 和 Fe 的丧失而形成,而不是来自于长石类的原生矿物。

伊利石和绿泥石的相关系数为 0.147,相关关系较弱;蛭石与绿泥石的相关系数为 0.779,相关性较强,表明由绿泥石进一步风化成伊利石可能性较小,而风化成蛭石的可能性较大。而蛭石和黑云母的相关系数为 0.937,说明蛭石是在湿热环境下由通过某些 Mg、K 和 Fe 的丧失形成绿泥石,然后进一步脱 Mg 形成。而纯黄土中没有蛭石,仅古土壤中存在蛭石,其含量应当与湿热化程度有关(张永双,2004),可作为古环境变化的标志。

蒙脱石与伊利石的相关系数为 0.815,为正强相关关系;与蛭石和绿泥石的相关系数分别为 0.209、0.192,为弱相关,表明蒙脱石更多是由于伊利石经过再结晶形成。

高岭石与长石的相关系数为−0.63、−0.32,为负相关关系,与其他黏土矿物,尤其是伊利石和蒙脱石的相关系数分别为 0.743、0.802,为强正相关关系,表明高岭石主要是来源长石的进一步分化,同时

与其他黏土矿物具有较强的伴生关系,是在 Ca、Mg、K、Na 易于被迅速淋洗的成土环境中,由硅酸盐分解伴随碱金属和碱土金属的丧失而形成的。

综上所述,陕西渭河中下游流域内的黏土矿物风化形成过程为黑云母—绿泥石—蛭石和长石—伊利石—蒙脱石—高岭石,但是前者的成土作用较弱,形成黏土矿物含量少,后者作用强,黏土矿物含量多。

3.3 土壤黏土矿物分布及其影响因素分析

黄土高原土壤的风化过程处于幼年—中间阶段,成土母质和气候因素(湿度和温度)是影响陕西渭河中下游流域土壤矿物形成的决定性影响因素(汤艳杰,2002;孙庆峰,2011)。因此,渭河南北不同地貌类型成土母质有所差异。温度、湿度不同,土壤中矿物种类虽相同,但含量有所差异(图 3),造成了秦岭北缘、渭北台塬、中低山区、河谷区域等不同区域具有不同风化过程(图 4)。

渭北台塬:以黑云母—绿泥石—蛭石为主,长石—伊利石—蒙脱石—高岭石为辅。主要渭北台塬多为耕地、园地,植被覆盖度高,耕作过程中不断施加黄土性质的土粪,逐步形成了壤土(庞奖励,2006),且地

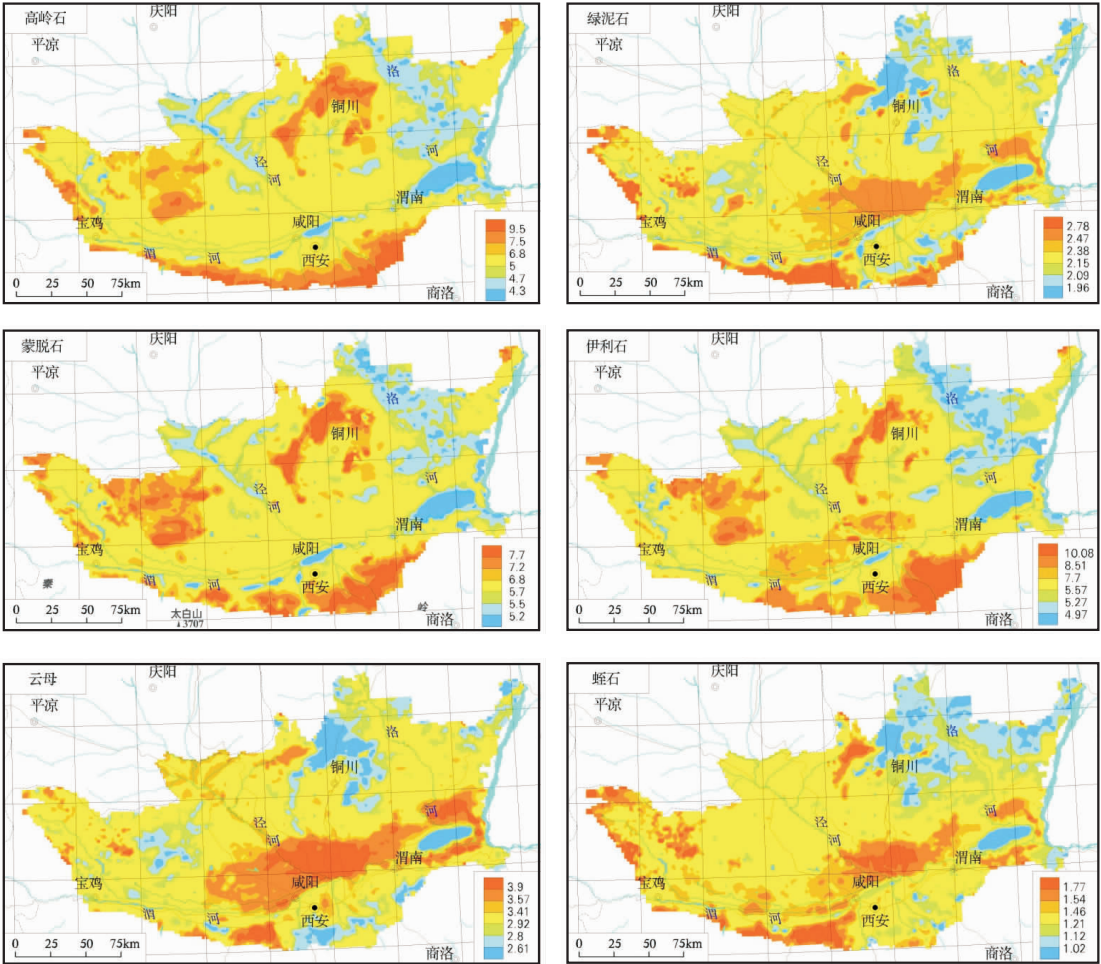


图 3 土壤中主要黏土矿物分布图

Fig. 3 Distribution of principal clay minerals in soil

势较高,平坦,更容易黏化。但是,其黏化程度较其他区域较弱,主要是由于壤化作用和灌淤化作用,易溶性盐在表层聚集,抑制蒙脱石、高岭石矿物的形成。

中低山区:以长石-伊利石-蒙脱石-高岭石为主,以黑云母-绿泥石-蛭石为辅。中低山区植被覆盖度高,植被发育、土壤剖面发育深厚,大量生物腐殖质以及形成的有机酸可使土壤变成酸性(武春林, 2018),有利于蒙脱石、高岭石的形成。植物残体释放出的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等相互作用可以形成次生黏土矿物(孙庆峰, 2011)。植被的发育使得地表粗糙度增加,流水和风对土壤的侵蚀程度减弱,搬运的碎屑减少,土壤中的黏土矿物则留在山区。

秦岭北缘:2 种风化过程共同作用。主要是由于秦岭多为基性岩区,含云母和变质岩较多,且在北

坡有仙游寺黏土(张永双, 2004),风化形成绿泥石、蛭石、伊利石和蒙脱石黏土矿物;中部偏东局部为酸性岩区,多形成了伊利石、蒙脱石、高岭石。同时由于生物残体腐烂分解,表土活性 K 丰富,经淋溶作用,蛭石、蒙脱石可能存在复 K 作用,变为伊利石的趋势。

河谷区域:2 种风化过程较弱,黏土矿物仍为水云母(杨振明, 1999),但是含量较低。黏土低值区域,地势较低,由于汇流聚集(宋佃星, 2016)和蒸发浓缩作用(赵梅, 2012;李成柱, 2018),引起可溶性盐聚积,泥沙淤积(焦菊英, 2004)。同时,水量较多,养分流失(张枝枝, 2017; 张文博, 2014),保持了原有的成土母质特征,成壤作用较弱,处于脱 K 阶段。黏土矿物的极低值,主要靠近河岸,部分地区为砂土、潮土,承袭黄土性冲积母质性质。

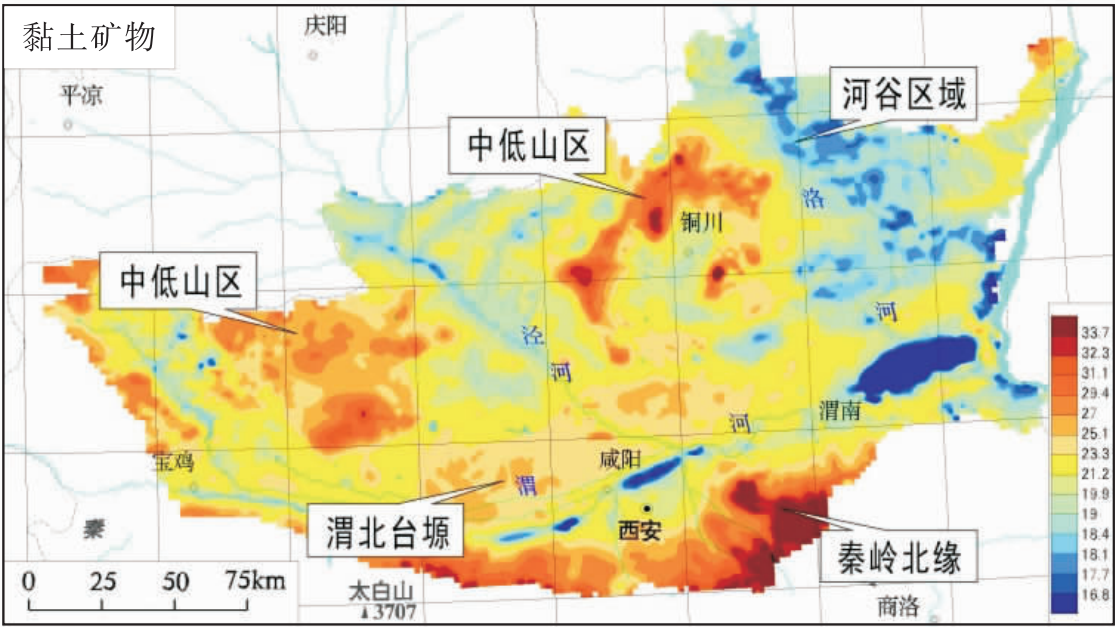


图 4 黏土矿物风化过程分区图

Fig. 4 Division of clay mineral weathering process

4 结论与建议

(1)采用线性规划求最优解模型,利用海量土地质量地球化学调查中的氧化物数据,能够较好地求出黏土矿物含量。该方法影响因素较少,简单易行,精度较高。

(2)渭河中下游流域主要黏矿物是伊利石、蒙脱石、高岭石,次要黏土矿物为蛭石和绿泥石,共同作用形成了不同黏土分布景观。渭北台塬以黑云母-绿泥石-蛭石为主,长石-伊利石-蒙脱石-高岭石为辅;中低山区以长石-伊利石-蒙脱石-高岭石为主,以黑云母-绿泥石-蛭石为辅;秦岭北缘 2 种风化过程共同作用,河谷区域则 2 种风化过程均较弱。

(3)从风化过程的相对阶段来说,伊利石及伊蒙混层矿物的组合显示土壤发育仍处于较幼年阶段。伊利石、绿泥石和蒙脱石标识弱风化强度,冷干气候;高岭石标识强风化程度,暖湿气候。各矿物含量标识了不同地史时期的冷干和暖湿古气候的交替变化。

(4)土壤中黏土矿物组合的异常高低值区,与河谷的冲积土、中低山区的黑垆土、渭北台塬的壤土、渭河阶地的沙土、黄泛区的潮土的范围极其相似,且土壤的性质也得到较好的反应,综合反映了土壤的

类型及其性质。

参考文献(References):

郝立波,陆继龙. 土壤黏土矿物含量计算方法研究[J]. 土壤通报,2006,37(3):0456-0459.

HAO Libo, LU Jilong. A method for the calculation clay mineral of soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(3): 0456-0459.

B. A. 柯达夫(陆保树等译). 土壤学原理[M]. 北京:科学出版社,1981,208-209.

B. A. KOBNA (translated by Lu Baoshu and others). Soil Science Principles[M]. Beijing: Science Press, 1981, 208-209.

刘浩,韩晶. MATLAB R2014a 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2016,314-323.

LIU Hao, HAN Jing. MATLAB R2014a Totally selftaught [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2016, 314-323.

孙庆峰,CHRISTOPHE Colin,陈发虎,等. 气候环境变化研究中影响黏土矿物形成及其丰度因素的讨论[J]. 岩石矿物学杂志,2011,30(2):0291-0300.

SUN Qingfeng, CHRISTOPHE Colin, CHEN Fahu , et al. A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental

- researches[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(2): 0291-0300.
- 师育新,戴雪荣,宋之光,等. 我国不同气候带黄土中黏土矿物组合特征分析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 0690-0695.
- SHI Yuxin, DAI Xuerong, SONG Zhiguang, et al. Characteristics of Clay Mineral Assemblages and Their Spatial Distribution of Chinese Loess in Different Climatic Zones[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 0690-0695.
- 郑洪汉, B. K. G. Theng, J. S. Whitton. 黄土高原黄土-古土壤的矿物组成及其环境意义[J]. *地球化学*, 1994, 23(suppl.): 113-123.
- ZHENG Honghan, B. K. G. Theng, J. S. Whitton. Mineral composition of loess-paleosol in the loess plateau of china and its environmental implications[J]. *Geochimica*, 1994, 23(Suppl.): 113-123.
- 赵景波,黄春长,韩佳,等. 长安县黄土中的风化壳与环境研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 28(3): 0115-0120.
- ZHAO Jingbo, HUANG Chunchang, HAN Jia, et al. Research on environment and weathering crusts in loess of Chang'an area[J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2000, 28(3): 0115-0120.
- 贾相岳. 黄土高原不同水热条件下黄土母质土壤矿物演化特征[D]. 武汉:华中农业大学, 2013, 38-39.
- JIA Xiangyue. Mineralogy characteristics of soil evolution on the loess parent minerals under different hydrothermal conditions on the Loess Plateau[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013, 38-39.
- 徐明岗,安战士. 陕西土壤的矿物组成与阳离子交换量关系的研究[J]. *西北农业大学学报*, 1989, 17(2): 87-92.
- XU Minggang, AN Zhanshi. A Study on the relationship between mineral composition and the cation exchange capacity in Shaanxi soils[J]. *Journal of Northwest A & F University*, 1989, 17(2): 87-92.
- 张青青,黄菁华,姚军,等. 淳化黄土—古土壤序列黏土矿物分布特征及古环境意义[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1062-1073.
- ZHANG Qingqing, HUANG Jinghua, YAO Jun, et al. Distribution of Clay Minerals in the Chunhua Loess-paleosol Sequence and Its Paleoenvironmental Significance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1062-1073.
- 张枝枝,张福平,燕玉超,等. 渭河两岸缓冲带的土壤有机质含量分布特征及其影响因子[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 393-399.
- ZHANG Zhizhi, ZHANG Fuping, YAN Yuchao, et al. Distribution Characteristics and Influential Factors of Soil Organic Matter Content at Buffer Zone Along Weihe River[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 393-399.
- 庞奖励,黄春长,张旭. 关中地区古耕作土壤和现代耕作土壤微形态特征及意义[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1395-1402.
- PANG Jiangli, HUANG Chunchang, ZHANG Xu. Micro-morphological Features of Old Cultivated and Modern Soil in Guanzhong Areas of Shaanxi Province, North China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1395-1402.
- 张永双,曲永新. 黄土高原马兰黄土黏土矿物的定量研究[J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 530-537.
- ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Quantitative research on the clay minerals composition of the Malan LOESS from the loess plateau in China[J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 530-537.
- 李小虎,张新虎,郑朋,等. 土壤矿物学研究综述[J]. *甘肃地质学报*, 2003, 12(1): 0037-0042.
- LI Xiaohu, ZHANG Xinhua, ZHENG Peng, et al. Advance on the research of soil mineralogy[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2003, 12(1): 0037-0042.
- 鲁春霞. 黏土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 456-460.
- LU Chunxia. The indicative role of clay minerals in paleoenvironmental research[J]. *Chinese Desert*, 1997, 17(4): 456-460.
- 杨振明,闫飞,韩丽梅,等. 我国主要土壤不同粒级的矿物组成及供钾特点[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 163-167.
- YANG Zhenming, YAN Fei, HAN Limei, et al. Mineral composition and potassium supply characteristics of different grains of China's main soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(4): 163-167.
- 汤艳杰,贾建业,谢先德. 黏土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 0337-0344.
- TANG Yanjie, JIA Jianye, XIE Xiande. Environmental significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 0337-0344.
- 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云. 风蚀水蚀交错区黄土黏土矿物特征及环境意义[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 0159-0162.
- QI Yanbing, CHANG Qingrui, LIU Mengyun. Clay mineral characteristics of loess as well as environmental significance in windwater erosion crisscross region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 0159-0162.
- 陈俊卿. 太白山北坡土壤的黏土矿物[J]. *土壤学报*, 1982,

- 19(3):273-282.
- CHEN Junqing. Clay minerals of soils on the north slope of Taibai Mountain[J]. Acta Pedologica Sinica, 1982, 19(3): 273-282.
- 徐速, 徐冠立, 孙传敏, 等. 成都地区主要粘性土壤的矿物学特征[J]. 科技通报, 2012, 28(10): 0007-0010.
- XU Su, XU Guanli, SUN Chuanmin, et al. Mineralogical character of main clay soils in Chengdu[J]. Science and Technology Bulletin, 2012, 28(10): 0007-0010.
- 孙一博, 刘朋飞, 王文科, 等. 渭河流域地下水的水化学特征及形成机制[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 152-158.
- SUN Yibo, LIU Pengfei, WANG Wenke, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the Weihe River Basin[J]. South to North Water Diversion and Water Technology, 2016, 14(2): 152-158.
- 奚小环, 陈国光, 张德存, 等. 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)(DZ/T 0258-2014)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- XI Xiaohuan, CHEN Guoguang, ZHANG Decun, et al. Specifications of multiPurpose regional geochemical investigation(1:250000)(DZ/T0258-2014)[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2015.
- 张文博, 张福平, 苏玉波, 等. 渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 0138-0143.
- ZHANG Wenbo, ZHANG Fuping, SU Yubo, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic matter and its influencing factors on two along the mainstream of the Weihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 0138-0143.
- 赵梅, 查小春, 黄春长, 等. 渭河流域全新世古洪水滞流沉积物地球化学特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 0106-0111.
- ZHAO Mei, CHA Xiaochun, HUANG Chunchang, et al. Geochemical characteristics of Holocene palaeoflood slack water deposits in the Weihe River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 0106-0111.
- 郭玉文, 宋菲, 加藤诚. 黄土中碳酸钙分布的能谱分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1004-1007.
- GUO Yuwen, SONG Fei, Makoto KATO. EDX of  $\text{CaCO}_3$  distribution in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1004-1007.
- 宋佃星, 马莉. 黄土高原碳酸钙含量变化特征及气候表征研究—以西安和宝鸡为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 0918-0923.
- SONG Dianxing, MA Li. The variety characteristic of calcium carbonate content and represented climate of the Loess Plateau [J]. Journal of Northwestern University (Natural Science Edition), 2016, 46(6): 0918-0923.
- 焦菊英, 马祥华, 王飞, 等. 渭河流域侵蚀产沙强度的区域分异特征[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 0060-0063.
- JIAO Juying, MA Xianghua, WANG Fei, et al. Regional Variation Features of Sediment Yield Intensity in the Wei River Basin[J]. Research Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 0060-0063.
- 王钦, 吴自立. 黄土丘陵沟壑区沟谷地土壤盐分态动研究[J]. 中国草业科学, 1987, 4(3): 18-22.
- WANG Qin, WU Zili. The research on soil salt distribution in gully valley of LOESS hilly gully area[J]. Chinese Grass Science, 1987, 4(3): 18-22.
- 张永双, 曲永新, 吴树仁, 等. 秦岭北缘仙游寺黏土(膨胀土)的发现及初步研究[J]. 现代地质, 2004, 18(3): 0383-0388.
- ZHANG Yongshuang, QU Yongxin, WU Shuren, et al. The discovery and preliminary research of clay(expansive soil) in the north edge of the Qinling range[J]. Geoscience, 2004, 18(3): 0383-0388.
- 黄春长, 延军平, 马进福, 等. 渭河阶地全新世成壤过程及人类因素研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1997, 25(2): 71-76.
- HUANG Chunchang, YAN Junping, MA Jinfu, et al. Pedological processes and human dimensions on Weihe river plain in Holocene [J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 1997, 25(2): 71-76.
- 武春林, 王瑞廷, 丁坤, 等. 中国土壤质量地球化学调查与评价的研究现状和进展[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 0240-0252.
- WU Chunlin, WANG Ruiting, DING Kun, et al. Geochemical survey and Evaluation on soil quality in China: Research Status and Advances[J]. Northwest Geology, 2018, 51(3): 0240-0252.
- 李成柱, 马洪云, 吴耀国. 关中盆地地下水无机指标数据集(2015年度)[J]. 中国地质, 2018, 45(S2): 23-29.
- LI Chengzhu, MA Hongyun, WU Yaoguo. An Inorganic Index Dataset of Groundwater in the Guanzhong Basin (2015)[J]. Geology in China, 2018, 45(S2): 23-29.
- JACKSON ML. Interlayering of expansible layer silicates in soils by chemical weathering[J]. Clays & Clay Minerals, 1962, 11(1): 29-46.