

## 吉林延边苹果梨主产区土地质量地球化学评价

徐倩, 王冬艳, 李月芬, 白荣杰, 尚媛

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061; 2. 吉林省地质调查院, 吉林长春 130000)

**摘要** [目的] 明确土壤中地球化学元素对土地质量的影响, 为土地利用服务。[方法] 通过实地调查, 在延边苹果梨主产区采集 120 个样品, 测试分析了 16 种元素和理化性质的相应指标, 从土地肥力、土地环境两个方面对研究区进行土地质量地球化学评价。[结果] 延边苹果梨主要种植区的土地肥力质量属于二等适中水平, 其中龙井肥力质量最高、琿春最差; 四个区域土地环境质量均处于优等状态, 仅在三合、图们个别样点存在 N、As 元素超标现象, 总体看来不存在土地重金属污染。[结论] 延边地区综合土地质量为优良水平, 对苹果梨种植很适宜。

**关键词** 延边苹果梨主产区; 土地质量; 地球化学评估; 土地肥力质量; 土地环境质量; 吉林省

中图分类号 S151.9 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)03-01185-03

**Geochemical Evaluation of Land Quality in Yanbian Apple-pear Main Production Areas**

**XU Qian et al** (College of Earth Science, Jilin University, Changchun, Jilin 130061)

**Abstract** [Objective] The study aimed to make clear the influence of soil geochemical elements on land quality, to provide the service for land utilization. [Method] Based on field survey, 120 samples were collected in Yanbian apple-pear main production areas, including Longjing, Sanhe, Hichun and Tunen. 16 elements and the corresponding physicochemical properties indices were tested and analyzed. The geochemical evaluation of study areas' land quality from the aspects of land fertility and land environment. [Result] Land fertility of Yanbian apple-pear main plantation areas belongs to the second-rate moderate level. Fertility of Longjing areas is the highest, while that of Hichun is the lowest. Land environment quality of the 4 areas is at an excellent condition, but N and As content exceed the standard in particular samples in Sanhe and Tunen. Generally, there isn't the land heavy metal pollution. [Conclusion] The comprehensive land quality of Yanbian area is at a good level, it's suitable for apple-pear plantation.

**Key words** Yanbian apple-pear main production area; Land quality; Geochemical evaluation; Land fertility quality; Land environment quality; Jilin Province

越来越多的研究表明, 土壤化学元素特征与作物优质高产有着密切的联系<sup>[1-2]</sup>, 因此, 对土地质量评价时应综合考虑各种有益有害元素对土地质量的影响。土壤地球化学评估是依据土地有益元素、有毒有害元素和有机污染物含量水平, 及其对土地基本功能的影响程度进行的土地质量级别评定, 以为提高农产品品质和食品综合生产能力提供基础地球化学资料, 并且在土壤配方施肥、污染治理及合理使用等微观领域起到指导作用<sup>[3]</sup>。现阶段对于土地质量的研究侧重于土地质量肥力评价和环境评价<sup>[4-9]</sup>, 而将土地质量与地球化学特征相结合进行评价的实例不多<sup>[10]</sup>。为此, 笔者结合研究区实际, 将微量元素纳入土地质量评价指标体系, 综合考虑土地肥力质量及土地环境质量, 旨在使土地质量评价结果更加全面。

**1 材料与方**

**1.1 研究区概况** 延边朝鲜族自治州位于吉林省东部, 属于中温带湿润季风气候, 其独特的冷湿气候很适宜苹果梨种植, 因此成为苹果梨的主产地, 已有 70 多年种植历史<sup>[11]</sup>。自生产以来, 延边地区已先后建立起龙井果树农场、延吉市园艺农场、和龙果树农场、图们市园艺农场和琿春果树农场, 产区苹果梨更是在 1989、1990 年分别被评为农业部部优产品和“绿色食品”。该文选择了龙井、三合、琿春、图们 4 个研究区对延边地区土地质量进行研究。

**1.2 评价指标与方法**

**1.2.1 评价指标。** 土地质量地球化学评估以土地中元素含量、pH 值和土壤有机质等为主要评估指标, 通常从土地肥力和土地环境两个方面评价土地的地球化学质量<sup>[3]</sup>。结合国

内外研究现状及研究区概况<sup>[4-6, 12-13]</sup>, 考虑有益微量元素在土地肥力中的重要性<sup>[1, 14]</sup>。该文选择土壤有机质、pH 值、水解 N、有效 P、速效 K、土壤质地、微量元素 (Cu、Zn、B、Mo、Mn) 等为土地肥力质量的评价指标; 结合土壤环境质量标准<sup>[15]</sup>, 选择 Hg、Cr、Cu、N、Pb、Zn、Cd、As 为土地环境质量评价指标。

**1.2.2 评价标准。** 土地肥力质量评价: 参照第二次全国土壤普查项目以及研究区土壤调查资料得到指标标准区间。其中, 有机质标准区间为 0~404 g/kg; pH 值标准区间为 6.0~7.0; 水解 N 标准区间为 0~240 mg/kg; 有效 P 标准区间为 0~25 mg/kg; 速效 K 标准区间为 0~250 mg/kg; 土壤质地标准区间为 0~6; 微量元素标准区间为 0~20。其中, 土壤质地的标准区间依据土体中砾石含量划分, 砾石含量越低值越高; 微量元素标准区间是依据第二次全国土壤普查结果的分级标准, 划定的 5 项元素整体级别变化幅度<sup>[2, 12]</sup>。

土壤环境质量评价: 参照《中华人民共和国国家标准土壤环境质量标准 (GB15618-1995)》<sup>[15]</sup>, 延边苹果梨主产区土壤属于该标准的 II 类, 采用二级标准。结合评价区域研究现状, 选择 Hg、Cr、Cu、N、Pb、Zn、Cd、As 在 pH 值为 6.5~7.5 范围内的含量作为土壤环境质量评价指标, 其评价标准见表 1。

表 1 土壤环境质量标准

Table 1 Soil environmental quality standard ng/kg

| 元素指标              | 环境标准                   |
|-------------------|------------------------|
| Element indicator | Environmental standard |
| Hg                | 0.5                    |
| Cr                | 200                    |
| Cu                | 200                    |
| N                 | 50                     |
| Pb                | 300                    |
| Zn                | 250                    |
| Cd                | 0.6                    |
| As                | 30                     |

基金项目 中国地质调查局和吉林省政府联合资助项目。

作者简介 徐倩(1986-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向: 土地资源评价。

收稿日期 2008-11-17

**1.2.3 评价方法。**假定一个各指标均最优的研究区为理想标准区,将实际研究区土地数据与标准区进行比较分析,原始数据经极差变换无量纲化处理<sup>[16]</sup>,采用层次分析法<sup>[17]</sup>确定权重,最后采用综合指数法<sup>[18]</sup>阐述研究区域的土地肥力状况。其中,综合指数法的计算公式为:

$$F = \sum w_i f_i \quad (1)$$

式中,  $F$  为土地肥力质量;  $w_i$  为指标  $i$  权重;  $f_i$  为指标  $i$  的土地肥力质量。

土地环境质量评价是结合土壤环境质量标准考虑<sup>[15]</sup>,采用单项污染指数法与内梅罗综合指数法<sup>[19]</sup>进行评价。其中,内梅罗综合指数法的计算公式为:

$$P_{综合} = \sqrt{(\frac{1}{N} \sum P_i)^2 + P_{max}^2} / 2 \quad (2)$$

式中,  $P_{综合}$  为土壤综合污染指数;  $P_{max}$  为污染物最大污染指数;  $\frac{1}{N} \sum P_i$  为污染指数平均值。

**1.3 样品采集及测试** 样品采集:在确定的研究区内根据苹果梨分布地的地质背景、地形地貌特征和土地类型等条件,选择品质和产量具有代表性的地块布设样点,4个研究区中各采样30件左右,共采集样品120件。

分析方法:将土样风干,用塑料棍碾碎,去除草根等杂物,过筛,测试方法为常规检测方法<sup>[20]</sup>,测试结果的统计数据见表2。

表2 4个研究区指标测试结果特征统计

Table 2 Statistics of the characteristics of index testing result in 4 research areas

| 土地质量<br>Land quality     | 指标<br>Index                | 珲春地区 Hunchun area |                                 |                  |                   | 龙井地区 Longjing area |                               |                  |                   | 三合地区 Sanhe area |                                 |                  |                   | 图们地区 Tunen area |                                     |                  |                   |
|--------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------|-------------------|
|                          |                            | n                 | P <sub>max</sub>                | P <sub>min</sub> | P <sub>aver</sub> | n                  | P <sub>max</sub>              | P <sub>min</sub> | P <sub>aver</sub> | n               | P <sub>max</sub>                | P <sub>min</sub> | P <sub>aver</sub> | n               | P <sub>max</sub>                    | P <sub>min</sub> | P <sub>aver</sub> |
| 土地肥力<br>Land fertility   | 有机质 Organic matter         | 11                | 21.34                           | 8.43             | 13.47             | 11                 | 24.55                         | 12.69            | 17.40             | 10              | 27.14                           | 7.31             | 17.25             | 8               | 27.43                               | 10.72            | 17.90             |
|                          | pH 值 pH value              | 32                | 6.04                            | 5.14             | 5.53              | 30                 | 6.79                          | 5.80             | 6.38              | 30              | 7.08                            | 5.16             | 6.37              | 28              | 6.98                                | 5.48             | 6.16              |
|                          | 水解N Hydrolytic N           | 32                | 205.4                           | 56.3             | 85.0              | 30                 | 370.4                         | 43.7             | 97.8              | 30              | 126.9                           | 24.9             | 76.3              | 28              | 160.7                               | 35.9             | 71.4              |
|                          | 有效P Available P            | 32                | 14.8                            | 0.4              | 3.1               | 30                 | 51.1                          | 0.9              | 12.5              | 30              | 51.8                            | 0.6              | 10.2              | 28              | 118.7                               | 0.7              | 12.1              |
|                          | 速效K<br>Rapidly available K | 32                | 230.2                           | 58.0             | 98.8              | 30                 | 288.0                         | 90.3             | 198.7             | 30              | 494.0                           | 43.3             | 227.0             | 28              | 564.0                               | 37.2             | 113.2             |
|                          | 土壤质地<br>Soil texture       | 10                | 中砾质 无砾质 中砾质<br>Middle No Middle |                  |                   | 10                 | 多砾质 无砾质 少砾质<br>Many No little |                  |                   | 10              | 中砾质 无砾质 中砾质<br>Middle No Middle |                  |                   | 10              | 中砾质 中砾质 少砾质<br>Middle Middle little |                  |                   |
|                          | 有效Cu Available Cu          | 32                | 1.38                            | 0.42             | 0.64              | 30                 | 6.22                          | 1.56             | 3.19              | 30              | 2.41                            | 0.58             | 1.25              | 28              | 6.57                                | 0.48             | 1.78              |
|                          | 有效Zn Available Zn          | 32                | 2.66                            | 1.07             | 1.70              | 30                 | 5.08                          | 1.47             | 2.27              | 30              | 5.40                            | 1.94             | 2.84              | 28              | 6.65                                | 1.08             | 2.52              |
|                          | 有效B Available B            | 32                | 0.514                           | 0.145            | 0.283             | 30                 | 0.506                         | 0.228            | 0.345             | 30              | 0.491                           | 0.212            | 0.331             | 28              | 0.358                               | 0.105            | 0.226             |
|                          | 有效Mn Available Mn          | 32                | 640.6                           | 55.2             | 230.3             | 30                 | 472.7                         | 93.4             | 195.6             | 30              | 1154.6                          | 72.6             | 509.8             | 28              | 598.4                               | 48.4             | 197.3             |
| 土地环境<br>Land environment | Hg                         | 32                | 0.027                           | 0.018            | 0.022             | 30                 | 0.04                          | 0.012            | 0.022             | 30              | 0.088                           | 0.018            | 0.035             | 28              | 0.215                               | 0.008            | 0.028             |
|                          | Cr                         | 32                | 90.52                           | 45.61            | 60.68             | 30                 | 68.65                         | 28.21            | 45.33             | 30              | 83.06                           | 38.57            | 64.2              | 28              | 153.32                              | 10.22            | 36.52             |
|                          | Cu                         | 32                | 19.23                           | 13.24            | 15.82             | 30                 | 40.2                          | 13.45            | 23.16             | 30              | 45.62                           | 13.78            | 26.04             | 28              | 25.32                               | 3.65             | 14.69             |
|                          | Ni                         | 32                | 25.99                           | 14.40            | 18.26             | 30                 | 27.8                          | 7.64             | 17.68             | 30              | 58.9                            | 14.66            | 30.99             | 28              | 52.08                               | 3.84             | 13.66             |
|                          | Pb                         | 32                | 36.16                           | 19.81            | 24.41             | 30                 | 38.35                         | 21.06            | 25.32             | 30              | 31.85                           | 13.31            | 23.59             | 28              | 32.62                               | 13.66            | 19.69             |
|                          | Zn                         | 32                | 63.17                           | 46.98            | 55.21             | 30                 | 77.11                         | 35.32            | 55.14             | 30              | 111.51                          | 70.79            | 93.36             | 28              | 84.18                               | 25.6             | 46.57             |
|                          | Cd                         | 32                | 0.140                           | 0.039            | 0.074             | 30                 | 0.129                         | 0.042            | 0.074             | 30              | 0.234                           | 0.065            | 0.154             | 28              | 0.101                               | 0.042            | 0.059             |
|                          | As                         | 32                | 5.8                             | 2.8              | 3.67              | 30                 | 9.3                           | 3.7              | 5.83              | 30              | 36.9                            | 5.8              | 17.16             | 28              | 38.4                                | 2.5              | 20.79             |

注:  $n$  为样品数;  $P_{max}$  为最大值;  $P_{min}$  为最小值;  $P_{aver}$  为平均值; 样品测试单位为吉林省地质科学研究所; 表中有机质含量单位为  $g/kg$ , N、P、K、微量元素、重金属元素含量单位为  $ng/kg$ 。

Note:  $n$ . Sample number;  $P_{max}$ . Maximum;  $P_{min}$ . Minimum;  $P_{aver}$ . Mean value; Sample testing institute is Jilin Geological Science Institute. Unit of soil organic matter is  $g/kg$ , unit of N, P, K, trace element and heavy metal is  $ng/kg$ .

**2 结果与分析**

**2.1 土地肥力质量** 从表2可以看出, 延边地区土地中有机质含量相对较低; 各研究区间有效P含量变化较大; 延边

地区土壤质地多为壤土、砂质壤土, 质地较好; 微量元素含量普遍较好。

表3 研究区肥力质量评价指标无量纲化处理结果及权重

Table 3 Result and weight of nondimensionalized treatment on the evaluation index of fertility quality in research area

| 指标<br>Index        | 珲春地区<br>Hunchun area | 龙井地区<br>Longjing area | 三合地区<br>Sanhe area | 图们地区<br>Tunen area | 理想标准区<br>Idea area | 权重<br>Weight |
|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 有机质 Organic matter | 0.34                 | 0.44                  | 0.43               | 0.45               | 1.00               | 0.275        |
| pH 值 pH value      | 0                    | 1.00                  | 1.00               | 1.00               | 1.00               | 0.026        |
| 水解氮 Hydrolytic N   | 0.35                 | 0.41                  | 0.32               | 0.29               | 1.00               | 0.182        |
| 有效磷 Available P    | 0.12                 | 0.50                  | 0.41               | 0.54               | 1.00               | 0.182        |
| 速效钾 Available K    | 0.40                 | 0.79                  | 0.91               | 0.47               | 1.00               | 0.182        |
| 土壤质地 Soil texture  | 0.73                 | 0.78                  | 0.67               | 0.35               | 1.00               | 0.045        |
| 微量元素 Trace element | 0.50                 | 0.60                  | 0.70               | 0.55               | 1.00               | 0.108        |

对于所选指标,结合第二次全国土壤普查项目有关指标标准及研究区的指标状况<sup>[2,12]</sup>,建立标准区间,依据标准区间对表2 数据进行极差变换处理<sup>[16]</sup>,得出研究区肥力质量评价指标的无量纲化处理结果,如表3 所示。利用层次分析法<sup>[17]</sup>,得到研究区各指标的权重,亦如表3 所示。其中,理想标准区为对比区域。

采用综合指数法,参照公式(1) 计算延边地区土地肥力质量,评价结果见表4。

表4 延边地区土地肥力质量评价结果

Table 4 Result of land fertility evaluation in Yanbian area

| 评价区域<br>Evaluation area | F     | 评价区域<br>Evaluation area | F     |
|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| 珲春地区 Hunchun area       | 0.339 | 图们地区 Tunen area         | 0.462 |
| 龙井地区 Longjing area      | 0.556 | 理想区域 Ideal area         | 1.000 |
| 三合地区 Sanhe area         | 0.548 |                         |       |

从表4 可以看出,4 个研究区的土地肥力状况都属于中等水平。4 个研究区中,龙井土地肥力质量最高,F 为0.556;珲春评价值 F 为0.338,土地肥力质量最低。

参照土地质量地球化学评估技术<sup>[3]</sup> 要求,依据土地肥力综合参数 F 进行土地肥力等级划分,土地肥力一等丰富对应 F 值为1.0~0.7,二等适量对应 F 值为0.7~0.3,三等缺乏对应 F 值为<0.3。4 个研究区的土地肥力综合参数都处于

表6 土壤污染分级标准<sup>[9]</sup>

Table 6 Standard of soil pollution classification<sup>[9]</sup>

| 等级<br>Grade | 综合污染指数<br>Synthesized pollution index | 污染等级<br>Pollution degree | 污染水平<br>Pollution level                            | 土地环境等<br>Land environment degree et al. |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------|--|---|
| 1           | P > 0.7                               | 安全 Safe                  | 清洁 Clean   | 清洁 一等<br>Clean (first-class)            |
| 2           | 0.7 < P < 1.0                         | 警戒线<br>Warning level     | 尚清洁<br>Yet clean                                   | 正常 二等<br>Normal (second-class)          |
| 3           | 1.0 < P < 2.0                         | 轻污染<br>Light-polluted    | 作物开始污染<br>lightly polluted plants                  | 污染 三等<br>Polluted (third class)         |
| 4           | 2.0 < P < 3.0                         | 中污染<br>Medium-polluted   | 土壤、作物均受到中度污染<br>Moderate polluted soil and plant   |   |
| 5           | P > 3.0                               | 重污染<br>Heavy-polluted    | 土壤、作物受污染相当严重<br>Seriously polluted soil and plants |   |

2.3 土地质量综合分等 依据土地肥力质量等级和土地环境质量等级划分结果,采用表7 所示分等标准,对研究区进行土地质量地球化学分等。结果表明,4 个研究区土地质量化学等皆为优良,说明延边苹果梨主要产区的土地综合质量较高。

表7 土地质量地球化学分等标准<sup>[3]</sup>

Table 7 Standards of the chemical classification of land quality

| 环境质量等<br>Environmental quality and so on | 肥力质量等        |           |             |
|--|--------------|-----------|-------------|
|  | 丰富 Rich      | 适量 Proper | 缺乏 Lack     |
| 清洁 Clean                                 | 优质 Excellent | 优良 Good   | 良好 Fine     |
| 正常 Normal                                | 优良 Good      | 优良 Good   | 良好 Fine     |
| 污染 Polluted                              | 中等 Medium    | 中等 Medium | 差等 Inferior |

3 结论与讨论

(1) 延边苹果梨主产区的土地肥力质量属于二等适中水

0.3~0.7,为二等适量水平。

表5 延边地区4 个研究区单项指数及内梅罗指数

Table 5 Nemerow indices and single index of four research areas in Yanbian

| 研究区域<br>Research area | 单项指数 Single index |             | 内梅罗指数<br>Nemerow index |
|-----------------------|-------------------|-------------|------------------------|
|                       | 最大值<br>Max        | 平均值<br>Mean |                        |
| 珲春地区 Hunchun area     | 0.365             | 0.167       | 0.284                  |
| 三合地区 Sanhe area       | 0.620             | 0.303       | 0.488                  |
| 龙井地区 Longjing area    | 0.354             | 0.170       | 0.278                  |
| 图们地区 Tunen area       | 0.690             | 0.203       | 0.509                  |

2.2 土地环境质量 该测试结果表明,除图们、三合地区个别样点存在 N、As 超标以外,其他6 项微量元素指标的含量均较低。

运用单项污染指数法及内梅罗综合指数法,参照公式(2) 对研究区的环境质量进行评价,4 个研究区的单项污染指数、内梅罗指数如表5 所示。结合表6 土壤污染分级标准,对比分析4 个研究区土壤环境质量。由6 表可知,4 个研究区土壤综合污染指数都较低,属于清洁级别,污染等级为安全,不存在土壤重金属污染。其中,三合地区的重金属含量相对较高。依据《土地质量地球化学评估技术要求》<sup>[3]</sup> 中关于土地环境等级划分标准,4 个研究区土地环境质量为一级清洁水平。

平。4 个研究区中,龙井、三合地区的土地肥力水平相对较高,而珲春地区较差。

(2) 延边地区的土地环境质量处于优等状态,不存在土壤重金属污染现象。其中,龙井、珲春地区的土地重金属含量相较于三合、图们地区更低。

(3) 延边地区的土地综合质量为优良水平。4 个区域的土壤均处于较好的状态,很适宜种植苹果梨。

参考文献

[1] 曾昭华. 农业生态的化学元素分类及其与作物优质高产的关系[J]. 湖南地质,2001,20(4):277-283.  
 [2] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社,1998.  
 [3] 中国地质调查局. 土地质量地球化学评估技术要求 试行[S]. 2007.  
 [4] 廖桂堂,李廷轩,王永东,等. 基于GIS 和地统计学的低山茶园土壤肥力质量评价[J]. 生态学报,2007,27(5):1978-1986.

表3 回归模型可靠性比较结果

Table 3 Reliability comparison of regression model

| 菌种类型<br>Type of bacteria                        | 样本数 n<br>Sample number | Catalyst 软件<br>Catalyst software |       | 比较分子场 CoMFA<br>Compared molecular field |       | 自由能法<br>Free energy method |       | 辛醇水分配系数 LogP<br>Octanol-water partition coefficient |       | 边邻接指数<br>Edge adjacent index |       |
|---|------------------------|----------------------------------|-------|---|-------|----------------------------|-------|---|-------|------------------------------|-------|
|   |                        | r <sup>2</sup>                   | s     | r <sup>2</sup>                          | s     | r <sup>2</sup>             | f     | r <sup>2</sup>                                      | s     | r <sup>2</sup>               | s     |
|   |                        |                                  |       |   |       |                            |       |   |       |                              |       |
|   |                        |                                  |       |   |       |                            |       |   |       |                              |       |
| 杆菌 Bacillus                                     | 18                     | 0.857                            | 0.310 | 0.950                                   | 0.190 | 0.843                      | 0.327 | 0.719   | 0.438 | 0.896                        | 0.285 |
| 发光杆菌<br>Photobacterium<br>phosphoreum           | 19                     | 0.910                            | 0.213 | 0.950                                   | 0.167 | 0.875                      | 0.248 | 0.752   | 0.349 | 0.940                        | 0.182 |
| 抑酚降解<br>Inhibition of phenol<br>degradation (1) | 19                     | 0.908                            | 0.087 | 0.882                                   | 0.104 | 0.794                      | 0.133 | 0.834   | 0.119 | 0.863                        | 0.112 |
| 大型蚤 Daphnia magna                               | 18                     | 0.832                            | 0.268 | 0.896                                   | 0.159 | 0.878                      | 0.166 | 0.777   | 0.224 | 0.902                        | 0.159 |
| 斑马鱼 Brachydanio rerio                           | 18                     | 0.848                            | 0.193 | 0.879                                   | 0.178 | 0.852                      | 0.191 | 0.734   | 0.256 | 0.883                        | 0.181 |

### 3 结语

笔者所建立的模型是纯粹基于拓扑指数- 拓展的边邻接指数的非经验 QSAR 模型, 和量子化学计算相比, 计算简便、可操作性强。拓展的边邻接指数的兼并度低, 唯一性好。与表征多氯酚生物毒性的值进行多元逐步回归建立的 QSAR 模型, 得到令人满意的方程。方程预测精度较高, 表明拓展的边邻接指数可用于多氯酚生物毒性机理研究和毒性预测。同时, 对各种生物毒性均有很好的预测能力, 说明该方法具有广泛的适用性。其缺点是物理意义尚不明确, 有待对边邻接指数进行深入研究。

### 参考文献

- [1] CZAPLICKA M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment [J]. Science of the Total Environment, 2004, 322: 21-39.
- [2] SUN B, COLE J R, SANFORD R A, et al. Isolation and characterization of *Desulfohalobium dechloracivans* sp. Nov., a marine dechlorination of acetate to the reductive dechlorination of 2-chlorophenol [J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66: 2408-2413.
- [3] EPA 822-Z-99-001 U.S. Environmental protection agency [M]. Washington: Office of Water, 1999.
- [4] LIU X H, CHEN J N, YU H X, et al. Quantitative structure activity relationship (QSAR) for toxicity of chlorophenols on L929 cells in vitro [J]. Chemosphere, 2006, 64: 1619-1626.
- [5] BRIENS F, BUREAU R, RAULT S, et al. Comparative molecular field analysis of chlorophenols. Application in ecotoxicology [J]. SAR QSAR Environ Res, 1994, 2: 147-157.
- [6] BRIENS F, BUREAU R, RAULT S, et al. Applicability of CoMFA in ecotoxicology: A critical study on chlorophenols [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 1995, 31: 37-

48.

- [7] BUREAU R, FAUCON J C, FAISANT J, et al. Applicability of the free energies of solvation for the prediction of ecotoxicity: Study of chlorophenols [J]. SAR QSAR Environ Res, 1997, 6: 163-181.
- [8] BRIENS F, BUREAU R, RAULT S. Applicability of CATALYST in ecotoxicology, a new promising tool for 3D QSAR: Study of chlorophenols [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1999, 43: 241-251.
- [9] RANDIC M. On characterization of molecular branching [J]. J Am Chem Soc, 1975, 97: 6609-6615.
- [10] ESTRADA E. Edge adjacency relationships and a novel topological index related to molecular volume [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1995, 35(1): 31-33.
- [11] ESTRADA E. Edge adjacency relationships in molecular graphs containing heteroatoms: A novel topological index related to molecular volume [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1995, 35(6): 701-707.
- [12] ESTRADA E, RAMIREZ A. Edge adjacency relationships and molecular topographic descriptors [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1996, 3: 837-843.
- [13] ESTRADA E, GUEVARA N, GUTMANI. Extension of edge connectivity index. Relationships to line graph indices and QSPR applications [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1998, 3: 428-431.
- [14] LEKSHMII T, LEKSHMII G, ALEKSIDZE N. Mathematical investigation of the carcinogenic activity of some hormone [J]. Bull Georgian Acad Sci, 1997, 155: 441-443.
- [15] ERNESTO ESTRADA. Edge-connectivity indices in QSPR/QSAR studies. 2. Accounting for long-range bond contributions [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1999, 39: 1042-1048.
- [16] NKOIIC S, TRUNAJIIC N. Comparison between the vertex and edge connectivity indices for benzenoid hydrocarbons [J]. Chem Inf Comput Sci, 1998, 38: 42-46.
- [17] 张大仁. 酚取代衍生物 QSAR 研究 [J]. 环境科学, 1995, 16(2): 4-6, 10.
- [18] 刘够生, 宋兴福, 于建国, 等. 氯代苯酚类衍生物对水生物发光细菌的定量结构-活性关系研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 313-316.

(上接第1187页)

- [5] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价 [J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 493-497.
- [6] 常庆瑞, 岳庆龄. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力质量 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 71-74.
- [7] 段飞舟, 何江, 高吉喜, 等. 污灌区农田土壤环境质量评价 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 114-116.
- [8] 吉玉碧, 谢锋, 谭红, 等. 基于 GIS 的贵州省农业土壤环境质量评价 [J]. 贵州农业科学, 2006, 34(1): 15-17.
- [9] 邓振义, 郝乾坤, 康克功. 凤县花椒产区土壤环境质量评价 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(3): 45-47.
- [10] 杨晓波, 曲亚军, 王文清, 等. 新时期农业发展需要土地质量地球化学评估 [J]. 国土资源, 2008(2): 28-29.
- [11] 郭文场, 杨柏明. 延边苹果梨 [J]. 植物杂志, 1997(6): 10-11.
- [12] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探 [J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247.

- [13] SMITH J L, HALVORSON J J, PAPENDICK R I. Using multiple variable indicators for evaluating soil quality [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 743-749.
- [14] 王德宣, 富德义. 吉林省西部地区土壤微量元素有效性评价 [J]. 土壤, 2002(2): 86-89.
- [15] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准 (GB15618-1995): 农业土壤化肥标准 SJ. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [16] 丁昌慧, 蔡辉, 祁新辉. 综合效益评价中数据的直线化无量纲化方法 [J]. 中国医院统计, 2001, 8(3): 163-165.
- [17] 王友青, 裴成荣. AHP——绩效考核指标权重系数确定的有效方法 [J]. 重庆职业技术学院学报, 2005, 14(1): 90-91, 116.
- [18] 贾玉霞. 环境质量综合指数评价方法的应用 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(S1): 10-11.
- [19] 钱天鸣, 余波. 内梅罗污染指数在运河水质评价中的应用 [J]. 环境污染与防治, 1999, 21(S1): 67-68, 140.
- [20] 李西开. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.