

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.029

舛水河流域土壤斥水性分布与影响因素研究

任长江<sup>1,2</sup> 赵 勇<sup>1</sup> 龚家国<sup>1</sup> 王建华<sup>1</sup> 李海红<sup>1</sup> 顾金普<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099)

**摘要:** 为了研究我国北方土石山区流域土壤斥水性影响因素及其分布规律,以舛水河流域为例开展了野外调查和室内研究。对流域内9种植被类型共385个土壤样本的滴水穿透时间(Water drop penetration time, WDPT)与土壤有机质含量、pH值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积进行统计分析。研究表明:WDPT由大到小依次为有林地、灌木林、疏林地、果园、高覆盖度草地、旱地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、滩地。有林地和灌木林为强烈斥水性,疏林地和果园为轻微斥水性,高覆盖度草地无斥水性,旱地、中覆盖度草地、低覆盖度草地和滩地为亲水性;土壤斥水性在流域的空间分布上表现为西北部、东北部和东南部山区斥水性较大,中部盆地斥水性较小;在垂向分布上表现为表层最大、中层次之、深层最小;WDPT与土壤有机质含量呈正相关性,与pH值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积呈负相关性;土壤pH值和有机质含量是斥水性的主要影响因素,质量分形维数、土壤颗粒比表面积是次要因素。

**关键词:** 舛水河流域; 土壤斥水性; 空间分布; 回归分析

中图分类号: S152.7      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2017)10-0237-08

Spatial Distribution and Effect Factors of Soil Water Repellency in Guishui River Basin

REN Changjiang<sup>1,2</sup> ZHAO Yong<sup>1</sup> GONG Jiaguo<sup>1</sup> WANG Jianhua<sup>1</sup> LI Haihong<sup>1</sup> GU Jinpu<sup>1</sup>

(1. Deperment of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China  
2. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Engineering, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** In order to research the distribution rule and influence factors of soil water repellency of rocky mountain area of northern China, the Guishui River Basin was taken as an example, the field investigation and lab analysis was carried out. Totally 385 soil samples of 9 different vegetation types were collected and the change rule between water drop penetration time (WDPT) with the factors of soil organic content, pH value, and mass fractal dimension and soil particle specific surface area was analyzed by the system. The research results showed that the order of soil water repellency degree was forest lands, shrubbery, open forest land, orchard, high coverage grassland, dryland, medium and low coverage grass land and beach land. The WDPT in northwest, northeast and southeast mountains of the basin was bigger, and in central basin was smaller in spatial distribution, meanwhile, the WDPT in soil surface was the most, intermediate was the second, and deep layers was the least in vertical direction. The WDPT had a positive correlation with the organic content, and it had an inverse correlation with pH value, mass fractal dimension and specific surface area. The pH value was the main influencing factor of WDPT for forest lands, shrubbery, orchard and high coverage grassland. The organic content was the major influence factor of WDPT for dryland, medium and low coverage grass land. For open forest land, the specific surface area was the principal influence factor of WDPT, and the mass fractal dimension was the major influence factor of WDPT for beach land.

**Key words:** Guishui River Basin; soil water repellency; spatial distribution; regression analysis

收稿日期: 2017-04-24    修回日期: 2017-08-09

**基金项目:** 流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(2015ZY01、2016ZY01)、国家重点研发计划项目(2016YFC0401407)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB452701)

**作者简介:** 任长江(1984—),男,博士后,南昌工程学院讲师,主要从事水文水资源研究,E-mail: 971932670@qq.com

**通信作者:** 赵勇(1977—),男,教授级高级工程师,主要从事水文水资源领域研究,E-mail: zhaoyong@iwhr.com

引言

土壤斥水性(Soil water repellency,SWR)是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象<sup>[1]</sup>,SWR 对生态水文过程产生重要影响,包括抑制水分入渗<sup>[2]</sup>,促进地表径流和侵蚀<sup>[3]</sup>,抑制种子萌发和植物生长<sup>[4]</sup>,增加地表土壤的团聚稳定性<sup>[5]</sup>进而影响到土壤碳的储存<sup>[6]</sup>等。土壤斥水性不仅在我国新疆<sup>[7]</sup>、内蒙古<sup>[8]</sup>等干旱地区,陕西<sup>[9]</sup>、山东<sup>[10]</sup>等半干旱地区也普遍存在,而且在西藏<sup>[11]</sup>、云南<sup>[12]</sup>等湿润地区也有分布。

土壤斥水性不仅受季节<sup>[13]</sup>、耕作制度<sup>[14]</sup>、灌溉方式<sup>[15]</sup>、土壤结构和质地<sup>[16]</sup>、水质<sup>[17]</sup>等多种因素影响,而且还受植被类型的影响。李金涛等<sup>[12]</sup>对热带雨林和橡胶林,孙棋棋等<sup>[10]</sup>对棕壤桃园,杨昊天等<sup>[8]</sup>对沙漠生态系统,牛健植等<sup>[11]</sup>对针叶林生态系统,张培培等<sup>[9]</sup>对黄土高原丘陵区等土壤斥水性分布规律及影响因素进行了研究。以上研究大多针对单一植被类型或者某一特定土壤,鲜有从流域角度对斥水性规律展开研究。单一植被条件下土壤斥水性的研究,能够较好揭示斥水性与土壤理化性质响应关系,但难以反映植被类型对斥水性的影响。在同一区域植被类型与土壤质地对土壤斥水性的影响,哪一个是主要因素,目前国内研究较少。本文以流域为研究对象,针对山区林地(有林地、疏林地)、山前过渡带(灌木林和果园),山脚高、中、低覆盖度草地、旱地和滩地等多种植被类型条件下的土壤斥水性展开研究,为深入研究土壤斥水性与山区水文过程响应关系提供理论依据。

1 研究区概况

研究区域位于距北京市 74 km 的延怀盆地东部延庆区,地处北纬 40°19′~40°38′、东经 115°44′~116°21′。东与怀柔相邻,南与昌平相邻,西面和北面与河北省怀来、赤城接壤,是一个北东南三面环山,西临官厅水库的小盆地。发源于延庆县城东北 13 km 的妫水河横贯延庆盆地,流域面积 1 073.6 km<sup>2</sup>,海拔 394~1 978 m。年平均气温 8℃,光照充足,雨热同季,昼夜温差大,属于蒙古高原到华北平原的过渡地带。境内林木资源丰富,有林地面积 12 万 hm<sup>2</sup>,林木覆盖率达到 60%。

2 研究方法

2.1 采样方案

根据 2016 年 7 月妫水河流域卫星遥感资料,通过 GIS 软件获取妫水河流域主要植被类型信息,选取疏林地、有林地、灌木林、果园、旱地、高覆盖度、中

覆盖度、低覆盖度草地、滩地 9 种主要植被类型作为采样对象,采样区域如图 1 所示。采样日期为 2016 年 7 月中旬,在水平方向上按照对角线取样法布点,采样间距 2.5 m,取样点 25 个,取表层 0~10 cm 土壤装入密封袋。在垂直方向上按照边长 5 m 的等边三角布点,分别将 3 个点的表层(10 cm)、中层(20 cm)、深层(30 cm)的土壤混合作为其在垂直方向上的样本,有效样本总计 385 个。

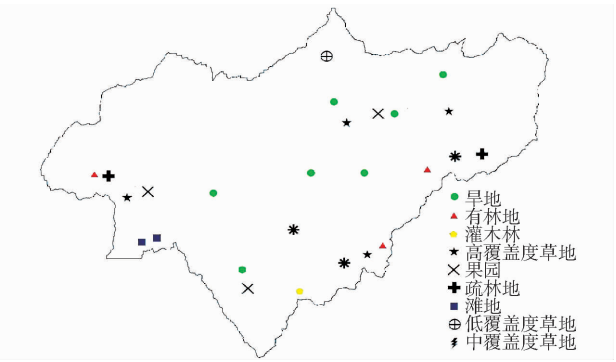


图 1 采样点布设方案  
Fig. 1 Layout schemes of sampling sites

2.2 测量方法

由于温度对土壤潜在斥水性有影响<sup>[18]</sup>,对土壤样本的不同处理方法,斥水性测量结果也不相同,因此对土壤样本分 2 种处理:将采集的样本放在恒温干燥箱 65℃ 下加热 12 h;将采集的样本室内自然风干 2 d。为了避免土壤容重以及结构<sup>[19]</sup>对斥水性的影响,将处理好的土壤过 2 mm 筛子,按照 1.4 g/cm<sup>3</sup> 容重填入直径 5 cm、高 3 cm 的铝盒,然后采用 WDPT 法对其进行测定。滴定溶液为纯净水,滴定管采用标准滴定管(0.48 mL/滴),滴头距离土面 1 cm,每一样本滴定 7 次,取其平均值作为样本滴水穿透时间。按照斥水性分类标准<sup>[20]</sup>对测量结果进行分类,斥水性按入渗时间可分为:亲水性(0~1 s)、无斥水性(1~5 s)、轻微斥水性(5~60 s)、强烈斥水性(60~600 s)、严重斥水性(600~3 600 s)、极度斥水性(>3 600 s)。以土壤有机质含量、pH 值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积为观测指标,土壤 pH 值测定按照 5:1 水土比配置土壤溶液,然后采用电位法进行测量;土壤有机质含量采用重铬酸钾—硫酸氧化法进行测量;土壤比表面积采用激光粒度仪湿法<sup>[21]</sup>测量;对于土壤质量分形维数的测量,首先根据马尔文 2000 型激光粒度仪获得土壤粒径分布,然后根据 TYLER 等<sup>[22]</sup>方法计算,本文土壤粒径测定尺度为 0.002 mm。各植被类型下土壤样本有机质含量(OC)、总氮含量(TN)、总磷含量(TP)、电导率(ED)、土壤容重(SBD)等土壤理化性质以及各植被面积如表 1 所示。

表 1 土壤理化性质及各植被面积

Tab.1 Soil physical-chemical properties and vegetation area

| 植被类型   | OC/(g·kg <sup>-1</sup> ) | TN/(g·kg <sup>-1</sup> ) | TP/(g·kg <sup>-1</sup> ) | ED/(μS·cm <sup>-1</sup> ) | SBD/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 面积/km <sup>2</sup> | 百分比/%  |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|--------|
| 有林地    | 51.982                   | 2.076                    | 0.190                    | 0.151                     | 1.237                     | 313.317            | 33.502 |
| 灌木林    | 38.819                   | 1.921                    | 0.181                    | 0.095                     | 1.378                     | 50.548             | 5.405  |
| 疏林地    | 37.602                   | 1.875                    | 0.268                    | 0.116                     | 1.443                     | 26.286             | 2.811  |
| 果园     | 30.144                   | 1.298                    | 0.074                    | 0.128                     | 1.455                     | 40.758             | 4.358  |
| 高覆盖度草地 | 23.546                   | 1.173                    | 0.168                    | 0.116                     | 1.304                     | 46.634             | 4.986  |
| 旱地     | 21.426                   | 1.093                    | 0.156                    | 0.101                     | 1.359                     | 321.070            | 34.331 |
| 中覆盖度草地 | 18.590                   | 0.893                    | 0.128                    | 0.113                     | 1.583                     | 7.682              | 0.821  |
| 低覆盖度草地 | 15.315                   | 0.767                    | 0.110                    | 0.120                     | 1.659                     | 15.778             | 1.687  |
| 滩地     | 14.616                   | 0.470                    | 0.089                    | 0.121                     | 1.402                     | 1.154              | 0.123  |

3 结果与分析

3.1 斥水性空间分布

土壤样本 2 种不同处理方法所测得表层滴水穿

透时间 WDPT 最大值、最小值、平均值如表 2 所示, WDPT 在垂直方向上的平均值如表 3 所示,对室内风干条件下的土壤 WDPT 采用 GIS 软件绘制斥水性空间分布图,WDPT 在全流域分布如图 2 所示。

表 2 不同植被类型土壤滴水穿透时间

Tab.2 WDPT for different vegetational types

| 植被类型   | 冠层<br>高度/m | 65℃ 加热 12 h |       |       |    | 室内风干 2 d |         |         |    |
|--------|------------|-------------|-------|-------|----|----------|---------|---------|----|
|        |            | 最大值/s       | 最小值/s | 平均值/s | 等级 | 最大值/s    | 最小值/s   | 平均值/s   | 等级 |
| 有林地    | > 15       | 15.563      | 0.348 | 5.679 | 轻微 | 661.250  | 189.216 | 327.440 | 强烈 |
| 灌木林    | 7 ~ 10     | 18.255      | 1.456 | 5.425 | 轻微 | 178.840  | 21.720  | 69.544  | 强烈 |
| 疏林地    | 3 ~ 5      | 2.355       | 0.746 | 1.104 | 无  | 23.780   | 13.220  | 17.587  | 轻微 |
| 果园     | 2 ~ 3      | 1.231       | 0.363 | 0.868 | 亲水 | 22.600   | 3.940   | 9.110   | 轻微 |
| 高覆盖度草地 | 1.2 ~ 2    | 1.846       | 0.436 | 0.845 | 亲水 | 6.040    | 1.840   | 3.777   | 无  |
| 旱地     | 2 ~ 2.3    | 1.193       | 0.354 | 0.725 | 亲水 | 1.030    | 0.485   | 0.803   | 亲水 |
| 中覆盖度草地 | 0.5 ~ 1.2  | 2.124       | 0.295 | 0.722 | 亲水 | 1.640    | 0.542   | 0.720   | 亲水 |
| 低覆盖度草地 | 0 ~ 0.5    | 1.553       | 0.351 | 0.696 | 亲水 | 0.890    | 0.323   | 0.691   | 亲水 |
| 滩地     | 0 ~ 0.2    | 1.068       | 0.366 | 0.596 | 亲水 | 1.750    | 0.406   | 0.664   | 亲水 |

表 3 不同植被类型土壤斥水时间垂直方向分布

Tab.3 Distribution of WDPT for different vegetational types in vertical direction s

| 植被类型   | 65℃ 加热 12 h |       |       | 室内风干 2 d |        |       |
|--------|-------------|-------|-------|----------|--------|-------|
|        | 表层          | 中层    | 深层    | 表层       | 中层     | 深层    |
| 有林地    | 6.352       | 3.616 | 2.698 | 327.440  | 36.465 | 6.578 |
| 灌木林    | 4.633       | 2.944 | 1.909 | 69.544   | 16.674 | 5.347 |
| 疏林地    | 1.368       | 0.906 | 0.801 | 17.587   | 6.658  | 2.674 |
| 果园     | 1.121       | 0.686 | 0.709 | 9.110    | 4.573  | 4.045 |
| 高覆盖度草地 | 0.979       | 0.855 | 0.825 | 3.777    | 1.453  | 1.684 |
| 旱地     | 0.898       | 0.898 | 1.016 | 0.862    | 0.823  | 0.786 |
| 中覆盖度草地 | 0.810       | 0.436 | 0.401 | 0.720    | 0.662  | 0.653 |
| 低覆盖度草地 | 0.772       | 0.551 | 0.456 | 0.691    | 0.765  | 0.348 |
| 滩地     | 0.787       | 0.722 | 0.588 | 0.664    | 0.567  | 0.673 |

由表 2 可知,对于有林地、灌木林、疏林地、果园和高覆盖度草地,2 种处理方法所得土壤斥水性差异较大,加热后的土壤样本只有有林地和灌木林表现出轻微斥水性,其他植被类型无斥水性或亲水性,加热后的土壤 WDPT 较自然风干条件下的 WDPT 小。对于旱地、中覆盖度草地、低覆盖度草地和滩

地,2 种处理方法所得 WDPT 相差较小,这表明温度对具有潜在斥水性的土壤有影响,而对于亲水性土壤影响不大。温度对斥水性影响是由于,一方面温度会影响土壤颗粒表面亲水功能团的排列方向<sup>[23]</sup>,面向土壤颗粒表面定向排列的亲水基在受热情况下杂乱地排列,致使亲水基和憎水基均匀分布,导致土壤斥水性消失;另一方面温度影响土壤含水率分布,而土壤斥水性对含水率的响应关系呈单峰曲线<sup>[24]</sup>,当土壤含水率在零到峰值含水率之间,土壤斥水性随着含水率的增大呈增加趋势,在峰值含水率时土壤斥水性达到最大值<sup>[25]</sup>。本研究室内自然风干的土壤具有较高的含水率(6% ~ 12%),而 65℃ 加热 12 h 后的土壤含水率较低(0 ~ 2%),因而在零到峰值含水率(10% ~ 20%)加热处理后的土壤具有较小的斥水性。

由表 2 也可以看出,土壤斥水性整体上表现为植被冠层越高斥水性越大的规律。这是由于有林地、灌木林、疏木林等区域属于 30 ~ 50 a 自然林,土

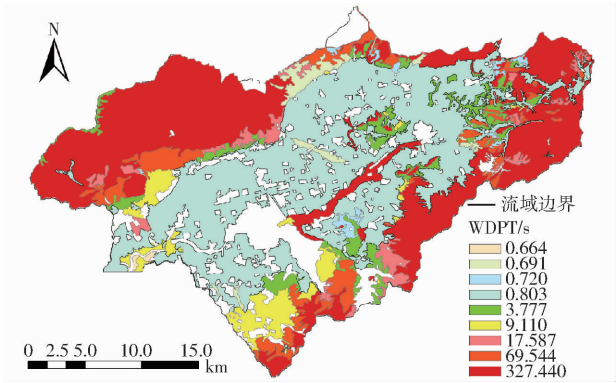


图 2 土壤斥水性空间分布示意图

Fig.2 Spatial distribution map of soil water repellency

壤较为肥沃,土壤腐殖质分解所形成有机质含量较高,因而其斥水性越大<sup>[26]</sup>,而旱地、草地等植被由于季节性翻耕、收割秸秆以及使用化学肥料,导致腐殖质在土壤中的量及形态发生变化<sup>[27]</sup>,处于妣水河两岸的滩地,周边植被所形成的腐殖质易被河水淋洗,因而其腐殖质含量也较少,相应的土壤斥水性也越

小。由表 3 可知,有林地、灌木林、疏林地、果园等植被类型的土壤 WDPT 在垂直方向表现出表层最大、中层次之、深层最小,而其它类型的植被则没有明显的变化规律。

由图 2 可以看出斥水性在空间上表现为:流域西北部、东北部和东南部山区的有林地和灌木林具有强烈的斥水性(69 ~ 327 s 之间),南部山前的疏木林和果园具有轻微的斥水性(9.1 ~ 17.6 s 之间),山前及山谷高、中覆盖度草地 WDPT 平均值在 3.78 s 左右,中部盆地旱地及中、低覆盖度草地为主的区域 WDPT 平均值在 0.69 ~ 0.80 s 之间,妣水河两岸最小,WDPT 在 0.664 s 左右,白色区域为城镇居民建设用地,未对其测量。

3.2 斥水性影响因素分析

将具有斥水性的 4 种植被(有林地、灌木林、疏木林、果园)土样的 WDPT 与影响因素采用幂函数进行拟合,WDPT 与土壤有机质含量、pH 值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积关系如图 3 ~ 6 所示。

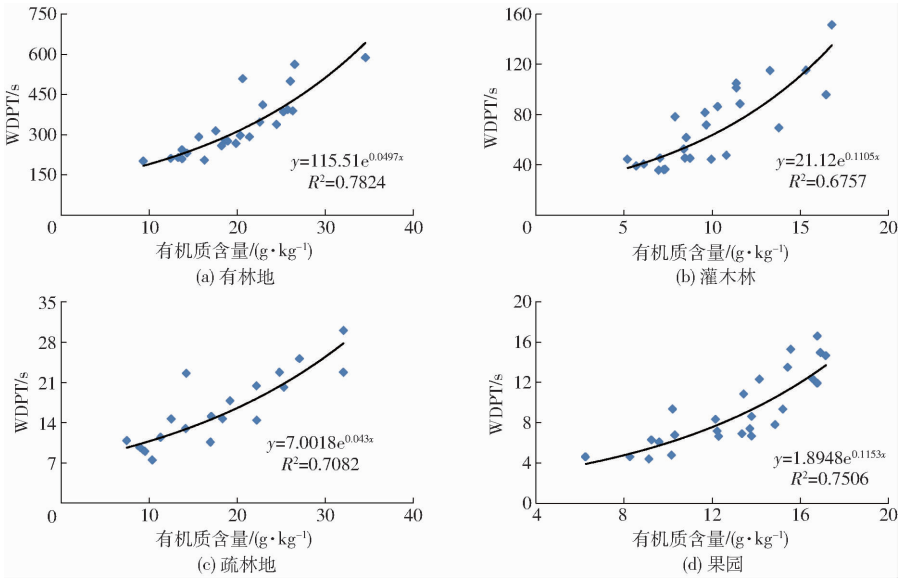


图 3 WDPT 与有机质含量关系

Fig.3 Relationships between WDPT and soil organic content

由图 3 可知,有机质含量与 WDPT 呈正相关性,这是因为土壤斥水性与有机质质量分数呈幂函数关系<sup>[28]</sup>,同种类型的土壤有机质含量越高土壤的斥水性物质越多,因而斥水性也越大。由图 4 可知,土壤 pH 值与 WDPT 呈负相关性,这是由于:①土壤 pH 值与有机质含量呈显著负相关性<sup>[29]</sup>,土壤 pH 值越大有机质含量越少,因而斥水性越小。②在一定范围内 pH 值越大水分扩散率越大,水分在土壤中扩散越快,相应的斥水性也越小<sup>[30]</sup>。③土壤 pH 值与胡敏酸含量呈显著负相关关系,pH 值越大疏水性的胡敏酸含量越少,相应的其斥水性也越小<sup>[31]</sup>,图 4 中各类型土壤 pH 值在 7.5 ~ 9.2 之间,9 种植被的

平均 pH 值分别为 8.22、8.08、8.53、8.49、8.56、7.49、8.46、8.54、8.11,研究区总体上偏碱性。研究区土壤 pH 值差异较大,一是研究区土地利用类型较多,不同植被类型土壤成土母质不同;二是研究区土壤质地均质性较差,土壤理化性质空间变异性较大。由图 5 可知,土壤质量分形维数与 WDPT 呈负相关性,这是由于质量分形维数越大,土壤中小于 0.002 mm 粒径的土壤颗粒占比越大,对土壤水分具有较强吸附力的小粒径颗粒也越多<sup>[32]</sup>,因而土壤斥水性相对越小。由图 6 可知,土壤颗粒比表面积与 WDPT 呈负相关性,这是因为土壤颗粒比表面积越大,土壤对水分的吸附能力越大<sup>[33]</sup>,相对的土壤斥

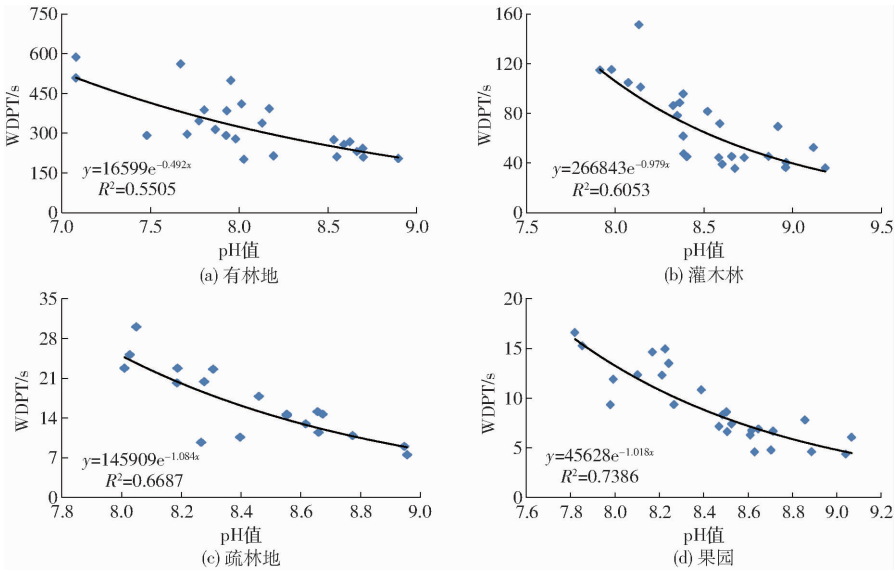


图 4 WDPT 与 pH 值关系

Fig. 4 Relationships between WDPT and pH value of soil

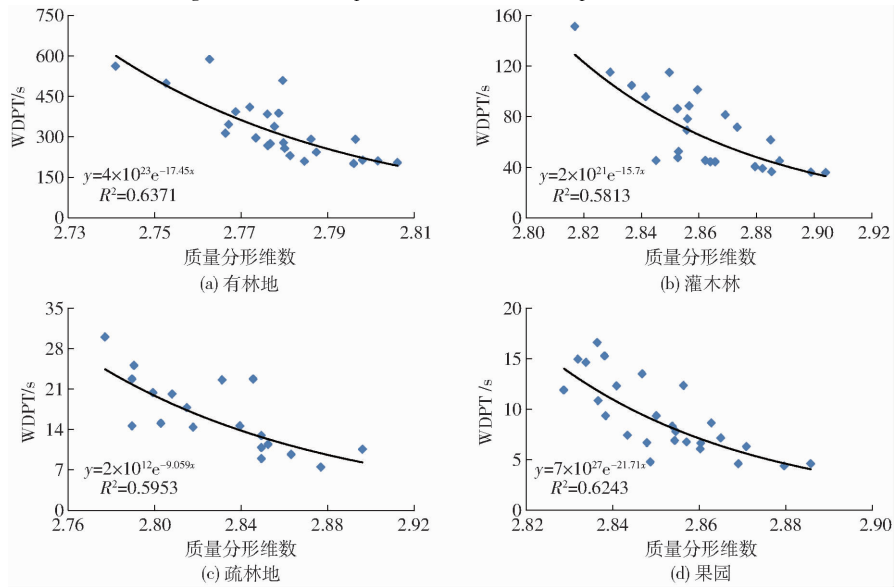


图 5 WDPT 与质量分形维数关系

Fig. 5 Relationships between WDPT and mass fractal dimension

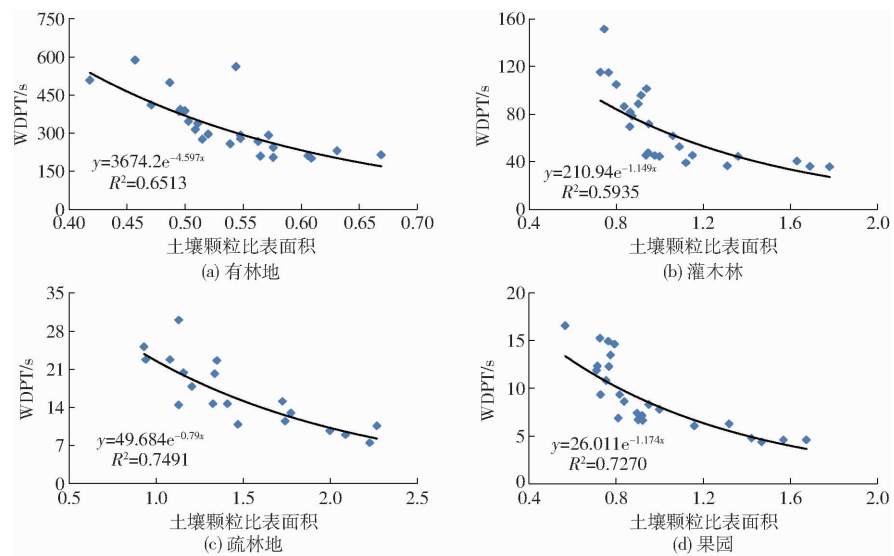


图 6 WDPT 与土壤颗粒比表面积关系

Fig. 6 Relationships between WDPT and specific surface area

水性也越大。

4 统计分析

对于具有斥水性的 4 种植被类型(有林地、灌木林、疏林地、果园),假定 WDPT 与土壤有机质含量、pH 值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积符合多元关系式,为

$$T = K\omega^{\alpha}\xi^{\beta}\psi^{\gamma}\zeta^{\lambda}$$

式中  $T$ ——滴水穿透时间,s

$\omega$ ——有机质含量,mg/kg

$\xi$ ——pH 值

$K$ ——模型系数

$\psi$ ——质量分形维数

$\zeta$ ——土壤颗粒比表面积

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$ ——各影响因素指数

对式(1)两边取对数可得线性方程,为

$$\lg T = \lg K + \alpha \lg \omega + \beta \lg \xi + \gamma \lg \psi + \lambda \lg \zeta$$

对式(2)进行多元回归分析,模型参数和参数  $t$  检验如表 4 所示。由表 4 可知,对于具有斥水性的 4 种植被类型,土壤有机质含量的指数  $\alpha$  均为正数,其值越大土壤斥水性越大;土壤 pH 值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积参数的指数  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  均为负数,说明土壤有机质含量与土壤斥水性呈正相关性,pH 值、质量分形维数、土壤颗粒比表面积与土壤斥水性呈负相关性,其值越大土壤斥水性越小。由  $t$  检验可知,对于有林地与灌木林均有  $|\beta| > |\alpha| > |\lambda| > |\gamma|$ ,说明影响其斥水性程度的因素由大到小依次为 pH 值、有机质含量、土壤颗粒比表面积、质量分形维数;对于疏林地  $|\beta| > |\gamma| > |\alpha| > |\lambda|$ ,影响其斥水性程度的因素由大到小依次为 pH 值、质量分形维数、有机质含量、土壤颗粒比表面积;对于果园  $|\beta| > |\alpha| > |\lambda| > |\gamma|$ ,影响其斥水性程度的因素由大到小依次为 pH 值、有机质含量、土壤颗粒比表面积、质量分形维数。

表 4 模型参数回归分析  
Tab.4 Regression analysis of model parameters

| 指数        | 模型参数        |           |          |          | 参数 $t$ 检验 |         |         |         |
|-----------|-------------|-----------|----------|----------|-----------|---------|---------|---------|
|           | 有林地         | 灌木林       | 疏林地      | 果园       | 有林地       | 灌木林     | 疏林地     | 果园      |
| $\alpha$  | 7. 04       | 4. 20     | 0. 18    | 0. 51    | 2. 59     | 2. 99   | 1. 04   | 2. 23   |
| $\beta$   | - 73. 49    | - 37. 93  | - 8. 08  | - 6. 24  | - 3. 15   | - 3. 17 | - 2. 13 | - 3. 80 |
| $\gamma$  | - 204. 92   | - 11. 17  | - 4. 21  | - 0. 83  | - 0. 84   | 0. 63   | - 1. 57 | 0. 35   |
| $\lambda$ | - 2 568. 57 | - 431. 82 | - 30. 63 | - 25. 14 | - 2. 09   | - 1. 84 | - 0. 89 | - 0. 64 |

5 结论

(1) 9 种植被类型的 WDPT 由大到小依次为有林地、灌木林、疏林地、果园、高覆盖度草地、旱地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、滩地,植被冠层越高斥水性越大。

(2) WDPT 空间上表现为流域西北部、东北部和

东南部山区斥水性较大,中部盆地斥水性较小,垂直方向上整体表现为表层最大、中层次之、深层次最小。

(3) 土壤有机质含量与斥水性呈正相关性,土壤 pH 值、质量分形维数、颗粒比表面积与斥水性呈负相关性。土壤有机质含量和 pH 值是斥水性的主要影响因素,质量分形维数和颗粒比表面积是影响斥水性的次要因素。

参 考 文 献

1 RITSEMA C J, DEKKER L W, HENDRICKX J M H, et al. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil [J]. Water Resources Research, 1993, 29(7): 2183-2194.

2 WANG Z, WU Q J, WU L, et al. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability [J]. Journal of Hydrology, 2003,231(41): 265-276.

3 RITSEMA C J, DEKKER L W. Distribution flow: a general process in the top layer of water repellent soils [J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1187-1200.

4 MOORE D, KOSTKA S, BOERTH T, et al. The impact of soil water repellency on hydrological properties of soil, the plant growing environment[C]//Irrigation Efficiency and Water Consumption, 2010.

5 DEKKER L W, RITSEMA C J. How water moves in a water repellent sandy soil. I. potential and actual water repellency [J]. Water Resources Research, 1994, 30(9): 2507-2517.

6 MATAIX-SOLERA J, DOERR S H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous top soils from fire-affected pine forests in southeastern Spain [J]. Geoderma, 2004, 118(1): 77-88.

7 邵志一,李毅. 玛纳斯河流域土壤水分及斥水性空间变异性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2): 207-213.

- SHAO Zhiyi, LI Yi. Spatial variability in soil moisture and water repellency in Manasi River basin [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2016, 44(2): 207–213. (in Chinese)
- 8 杨昊天, 刘立超, 高艳红, 等. 腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水性特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 674–682.  
YANG Haotian, LIU Lichao, GAO Yanhong, et al. Characteristic of soil water repellency in stabilized sand dunes in the Tengger desert [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 674–682. (in Chinese)
- 9 张培培, 赵允格, 王媛, 等. 黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 657–663.  
ZHANG Peipei, ZHAO Yunge, WANG Yuan, et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 657–663. (in Chinese)
- 10 孙棋棋, 刘前进, 于兴修, 等. 沂蒙山区桃园棕壤斥水性对理化性质的空间响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 648–655.  
SUN Qiqi, LIU Qianjin, YU Xingxiu, et al. Spatial response of water repellency to physicochemical properties in peach (*Prunus persica*) orchard brown soil in Yimeng Mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 648–655. (in Chinese)
- 11 牛健植, 余新晓, 赵玉涛, 等. 贡嘎山暗针叶林生态系统土壤斥水性分析[J]. 中国科技论文在线, 2010, 18(3): 1912–1918.  
NIU Jianzhi, YU Xinxiao, ZHAO Yutao, et al. Water repellency in soils in the dark coniferous forest ecosystem of Gongga Mountain [J]. Science Paper Online, 2010, 18(3): 1912–1918. (in Chinese)
- 12 李金涛, 刘文杰, 卢洪健. 西双版纳热带雨林和橡胶林土壤斥水性比较[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(增刊 1): 391–398.  
LI Jintao, LIU Wenjie, LU Hongjian. Comparison of water repellency in the tropical rainforest and rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. Journal of Yunnan University: Nat. Sci. Ed., 2010, 32(Sup. 1): 391–398. (in Chinese)
- 13 李子忠, 吴延磊, 龚元石, 等. 内蒙古草原土壤斥水性的季节变化[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 208–213.  
LI Zizhong, WU Yanlei, GONG Yuanshi, et al. Seasonal change of soil water repellency in Inner Mongolia grassland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 208–213. (in Chinese)
- 14 杨邦杰. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351–359.  
YANG Bangjie. Hydrothermal movement rule and numerical model in water repellent soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 351–359. (in Chinese)
- 15 巨娟丽, 李毅, 宋红阳, 等.  $\text{CaCl}_2$  溶液灌溉对土壤水盐与斥水性分布的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 159–166. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141025&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141025&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.025.  
JU Juanli, LI Yi, SONG Hongyang, et al. Effects of  $\text{CaCl}_2$  solution irrigation on distributions of soil water, salt and water repellence [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 159–166. (in Chinese)
- 16 毕利东, 马春平, 陈丹, 等. 土壤斥水性在土壤团聚体内的空间分异研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2014, 36(6): 54–57.  
BI Lidong, MA Chunping, CHEN Dan, et al. Spatial variation of soil water repellency in soil aggregate [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences Edition, 2014, 36(6): 54–57. (in Chinese)
- 17 商艳玲, 李毅, 朱德兰. 再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 89–97.  
SHANG Yanling, LI Yi, ZHU Delan. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 89–97. (in Chinese)
- 18 陈俊英, 张智韬, 吴普特, 等. 烘干温度和时间对潜在土壤斥水性的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(4): 11–14.  
CHEN Junying, ZHANG Zhitao, WU Pute, et al. Study on the effect of drying temperature and time on potential soil water repellency [J]. Water Saving Irrigation, 2012(4): 11–14. (in Chinese)
- 19 杨松, 吴珺华, 董红艳, 等. 砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 421–426.  
YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. Soil water repellency of sands and clay as affected by particle size [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 421–426. (in Chinese)
- 20 RITSEMA C J, DEKKER L W. Soil water repellency: occurrence, consequences, and amelioration [J]. Journal of Physics A Mathematical & Theoretical, 2003, 45(6): 2140–2154.
- 21 杨道媛, 马成良, 孙宏魏, 等. 马尔文激光粒度分析仪粒度检测方法及其优化研究[J]. 中国粉体技术, 2002, 8(5): 27–30.  
YANG Daoyuan, MA Chengliang, SUN Hongwei, et al. Study on the particle size test method and its optimization for Malvern laser particle size analyzer [J]. China Powder Science and Technology, 2002, 8(5): 27–30. (in Chinese)
- 22 TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362–369.
- 23 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 1–6.  
CAO Xiaobin, WU Guangning, FU Longhai, et al. Study of the temperature impact on soil resistivity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 1–6. (in Chinese)
- 24 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 35–38.  
CHEN Junying, ZHANG Zhitao, YANG Fei, et al. Modeling water repellency and water content of a sand soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 35–38. (in Chinese)
- 25 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 63–67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120101&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120101&journal_id=jcsam)

- www.j-csam.org/ch/reader/create\_pdf.aspx? file\_no = 20120113&flag = 1&journal\_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.013.
- CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 63–67. (in Chinese)
- 26 井大伟,王明友,张红,等. 蚯蚓粪配施尿素对豇豆根系特征与根际土壤腐殖质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(1): 212–219. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20170128&journal\\_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170128&journal_id = jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.028.
- JING Dawei, WANG Mingyou, ZHANG Hong, et al. Effects of vermicompost coapplied with urea on root characteristics and humus in rhizosphere soil of cowpea [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1): 212–219. (in Chinese)
- 27 徐丹,刘昌华,蔡太义,等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(12): 157–163. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20151222&journal\\_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151222&journal_id = jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.022.
- XU Dan, LIU Changhua, CAI Taiyi, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 157–163. (in Chinese)
- 28 陈俊英,吴普特,张智韬,等. 土壤斥水性与有机质质量分数的变化关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2012,31(3): 96–98.
- CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. The relationship between WDPT and soil organic matter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012,31(3): 96–98. (in Chinese)
- 29 戴万宏,黄耀,武丽,等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):851–860.
- DAI Wanhong, HUANG Yao, WU Li, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in top-soil of zonal soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5):851–860. (in Chinese)
- 30 龚恩磊,王辉,胡传旺,等. 酸性溶液对红壤水分入渗特征影响及其模拟研究[J]. 水土保持学报, 2015,29(1): 48–51.
- GONG Enlei, WANG Hui, HU Chuanwang, et al. Simulation and influence of acid solutions on the hydraulic characteristics of red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 48–51. (in Chinese)
- 31 李自刚,岳晓禹,李长滨,等. 基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(2):300–304. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20170240&journal\\_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170240&journal_id = jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.040.
- LI Zigang, YUE Xiaoyu, LI Changbin, et al. Near infrared spectral modeling analysis based on variable selection of compost hemic acid content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 300–304. (in Chinese)
- 32 曾宪勤,刘和平,路炳军,等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008,26(1): 65–70.
- ZENG Xianqin, LIU Heping, LU Bingjun, et al. Fractal dimension of soil particle size distribution characteristic in the Beijing mountains [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 65–70. (in Chinese)
- 33 DIEHL D. Cheminform abstract: soil water repellency: dynamics of heterogeneous surfaces [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2013, 432(38): 8–18.

(上接第 251 页)

- 16 贺庆之,贺静. 单一平面电容传感器原理与应用[J]. 工业仪表与自动化装置,2001(5): 62–63,58.
- HE Qingzhi, HE Jing. The principle and application of a single planar capacitance sensor[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2001(5): 62–63,58. (in Chinese)
- 17 李建青,马争争,田旭. 非平行板电容器电容和电场的两种计算方法之讨论[J]. 大学物理,2008,27(8):21–23.
- LI Jianqing, MA Zhengzheng, TIAN Xu. Discussion on methods of two kinds for calculating capacitance and electric field of an unparallel-plate capacitor[J]. College Physics, 2008,27(8):21–23. (in Chinese)
- 18 高志涛,田昊,赵燕东. 土壤剖面水分线性尺度测量方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):257–264. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx? flag = 1&file\\_no = 20170433&journal\\_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170433&journal_id = jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.033.
- GAO Zhitao, TIAN Hao, ZHAO Yandong. Linear scale measurement method for soil profile moisture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4):257–264. (in Chinese)
- 19 刘国强,赵凌志,蒋继姬. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- 20 王海田. 电容器电场有限元方法研究[J]. 东方电气评论,2004,18(4):194–196.
- WANG Haitian. Research electric field of the capacitor with finite element method[J]. Dongfang Electric Review,2004, 18(4): 194–196. (in Chinese)
- 21 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.