

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.003

西北干旱区土壤盐渍化遥感信息模型

孙 涛¹ 李纪人^{1,2} 潘世兵¹

(1. 中国水利水电科学研究院遥感中心 , 北京 100048 ; 2. 北京大学数字中国研究院数字流域研究中心 , 北京 100871)

摘要 : 结合对西北干旱区土壤盐渍化的影响因子研究 , 基于因子分析、物理量纲分析和 Π 定理 , 建立了土壤盐渍化遥感信息模型 . 通过公式推导 , 得到了典型区域遥感信息模型的一般表达式 , 研究了多种因素组合对盐渍化形成和演化的作用 . 将模型应用于疏勒河流域双塔盆地 , 对该区域未来 50 a 的土壤盐渍化发展变化情况进行了预测 . 结果表明 , 双塔盆地土壤总体盐渍化面积基本不变 , 现状非盐渍土类型略有增加 , 同时轻盐土面积明显减少 , 特重盐土减弱为中、重盐土类型 . 土壤盐渍化遥感信息模型在一定程度上反映了区域盐渍化的情况 , 能够定量评价盐渍化的影响 .

关键词 : 土壤盐渍化 ; 量纲分析 ; Π 定理 ; 遥感信息模型 ; 疏勒河

中图分类号 : S156.4 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2009)05-0505-06

1 遥感信息模型

遥感信息模型集地形模型、物理模型和数学模型为一体 , 应用遥感信息和地理信息系统影像化方法 , 由几何相似率、物理相似率、数学方程组成 . 根据遥感信息中的独立变量和地理信息系统中的影像化变量 , 进行以像元为单元的数学运算 . 遥感信息模型的核心是将量纲分析、 Π 定理和地学统计方法相结合 , 是解决复杂地理现象和地理过程较成功的地学模型 . 目前遥感信息模型的主要研究成果见表 1^[1-3].

表 1 基于量纲分析理论的遥感信息模型主要研究成果

Table 1 Main research results of remote sensing information models based on dimensional analysis

典型模型	遥 感 信 息 模 型 方 程
热惯量遥感信息模型	$ATI = \frac{1 - (0.423 G_{chl} + 0.577 G_{chl2})}{T_{chl\ day} - T_{chl\ night}}$
作物旱灾损失估算遥感信息模型	$1 - \frac{Y_d}{Y} = k \left(1 - \frac{E_{c.a}}{E_{N\ max}} \right)^n$
悬浮泥沙含沙量遥感信息模型	$\varphi_{s.w} = A_{\varphi} + B_{\varphi} \ln(D_{\varphi} - L)$
土壤水力侵蚀遥感信息模型	$E_{sl} = a_0 \left(\frac{I - I_0}{I_0} \right)^{a_1} h_{sl} \left(\frac{\delta_{sl}}{D} \right)^{a_2} (\sin 2\alpha)^{a_3} \exp(- a_4 S_{vc})$
土地生产潜力遥感信息模型	$LPY = \sum_{i=1}^{12} \frac{K_a F_0 Q_{ph.i}}{\alpha (1 - B) (1 - H)} (l_i) (T_i) (w_i) (s_i)$
空气污染遥感信息模型	$C = a_0 K_x^{a_1} K_y^{a_2} \frac{Q}{ul^2}$
植物光合作用遥感信息模型	$y_b = a_0 \left(\frac{I_R - R}{I_R + R} \right)^{a_1} R^{1/3} (\alpha CO_2)^{a_3}$
海岛旅游业遥感信息模型	$T_v = a_0 \left(\frac{W_p}{W} \right)^{1.5} (D_p A_p) \left(\frac{H}{C_p} \right) M$
水环境自净容量遥感信息模型	$W = \alpha \frac{ul^2}{Q} \gamma (\frac{h}{l}) \gamma^2 (\frac{kl^3}{Q}) \gamma^3 Q C_s$

自然界中各物理量之间存在着必然的联系,各物理量都是由一些统一、和谐的基本量组成或表示的.在分析地理、物理现象和研究其规律时,可以用物理学中基本和本质的量纲分析理论去探索^[3].量纲分析理论可以用来研究复杂的现象,它提供了一种事先的定性理论分析.根据合理的观测数据找出内在规律的数学表达式,从而达到认识所研究的物理现象的本质.量纲分析理论在流体力学、航空、爆炸技术、天体物理等问题中应用十分广泛,极大地推动了这些学科理论和实验研究的发展^[4].为了定量研究有关的物理现象及其规律,可以选择几个最为基本的量(基本量),并在此基础上引导出导出量.经过量纲分析将基本量与导出量通过描述自然规律的方程式或定义新物理量的方程式相互联系起来.

2 量纲分析理论

凡是正确反映客观规律的物理方程,其各项的量纲都必须一致,量纲不和谐的公式将逐渐被淘汰,即通过量纲分析达到量纲和谐.量纲分析法通常采用 Π 定理(量纲为 1 的数是用 Π 来表示的,故称为 Π 定理),由白金汉(Buckingham)在 1914 年提出,要求方程中各项的量纲是一致的.设某研究问题中涉及 n 个物理量(包括物理常量) $P_1, P_2, \dots, P_n$,其中有 m 个基本量($n > m$), m 个基本量量纲独立,它们量纲的矢量彼此线性无关^[5-6].假如它们的量纲为 $X_1, X_2, \dots, X_m$,用 P 代表导出量 P 的量纲,则有

$$P = X_1^{a_1} X_2^{a_2} \dots X_m^{a_m} \tag{1}$$

式(1)两边取对数,得

$$\ln P = a_1 \ln X_1 + a_2 \ln X_2 + \dots + a_m \ln X_m \tag{2}$$

式(2)中 $\ln X_1, \ln X_2, \dots, \ln X_m$ 可以看作是 m 维空间的“正交基矢”,则 $(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 就是“矢量” $\ln P$ 在基矢上的投影,是它的“分量”.为了简便,把量纲式写成 $(a_1, a_2, \dots, a_m) (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi})^T (i = 1, 2, \dots, m)$,它们组成的行列式不等于 0:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mm} \end{vmatrix} \neq 0 \tag{3}$$

由此则可组成 $n - m$ 个量纲为 1 的量 $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}$ 在 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 之间存在的函数关系式 $f(P_1, P_2, \dots, P_n) = 0$,写成相应的无量纲形式:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \tag{4}$$

在解决物理问题时,按如下的步骤和方法进行.

a. 提炼物理问题涉及的物理量的量纲式:

$$\prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i} = \pi \quad x_i = \prod_{j=1}^m X_j^{\beta_{ij}} \tag{5}$$

b. 构造量纲矩阵,写出量纲矩阵方程:

$$\prod_{j=1}^m X_j \sum_{i=1}^n \beta_{ij} a_i = \prod_{j=1}^m X_j^0 \tag{6}$$

c. 求解量纲矩阵方程的基础解系:

$$\sum_{i=1}^n \beta_{ij} a_i = 0$$

如果方程组的秩为 r ,则有 $n - r$ 个基本解

$$a^{(s)} = (a_1^{(s)}, a_2^{(s)}, \dots, a_n^{(s)})^T \quad (s = 1, 2, \dots, n - r) \tag{7}$$

d. 按 Π 定理写出物理量的关系式:

$$\prod_{i=1}^n X_i^{a_i^{(s)}} = \pi_s \quad (s = 1, 2, \dots, n - r) \tag{8}$$

根据以上分析,建立和应用遥感信息模型首先应根据所研究问题的性质,选择相应的独立变量,然后在物理量纲分析理论的指导下,应用 Π 定理进行物理量之间的量纲分析,即进行无量纲化处理,由此得到一个半经验、半理论的公式.根据实测资料,在像元基础上,进行非线性的数理统计分析,求出地理系数和地理指数,最后根据建立的模型进行地学评价和预报.

3 土壤盐渍化遥感信息模型建立

目前对盐渍化预测方面的研究多是定性的,涉及的影响因子不够全面.在缺乏充分理论指导的情况下,定性的经验模型是以经验的判断和分析提出函数和简单方程来表达现象之间的规律.它对过程或现象缺乏机理的认识.模型建立仅依据有限范围内的实验和过程数据,放大和外延使用有一定的风险.导致次生盐渍化的发生因素很多,彼此之间具有不同的量纲.建立基于物理理论基础的遥感信息模型是解决这个问题的有效途径^[7].

根据通用遥感信息模型理论,土壤盐渍化遥感信息模型的建立分为 3 个步骤.首先分析致渍因素,选择独立变量后进行量纲分析,得到相应的相似准则,在此基础上得到盐渍化遥感信息模型经验公式,计算参数,运行模型(图 1).

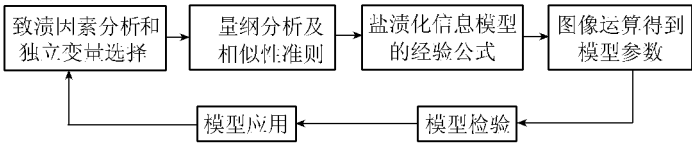


图 1 土壤盐渍化遥感信息模型建模流程

ig. 1 Flow chart of remote sensing information model of soil salination

研究表明,土壤盐渍化受气候因素、地质、地貌、水文地质因素及植被、土壤因素的影响,且这些因素之间相互依存,影响因子多而复杂.气候因素包括降水强度 P 、蒸发量 E ;地质因素表现为包气带中黏性土顶板埋深 C_d ;地貌因素表现为盐渍土地形变化,可量化为坡度 S_a 和坡角 S_d ;水文地质因素包括地下水埋深 G_d 和地下水矿化度 G_m .植被和土壤质地对盐渍土的综合影响机理尚不清楚,植被覆盖在一定程度上反映了土壤盐渍化情况,土壤质地对土壤盐渍化的影响也会通过植被覆盖体现^[8-12],为此,集中概化为归一化植被指数 α_{NDVI} 描述植被和土壤质地对土壤盐渍化的影响.

以 S_s 表示土壤含盐量,则各影响因子之间的函数关系可表示为

$$S_s = f(P, E, G_d, G_m, \alpha_{NDVI}, S_a, S_d, C_d) \tag{9}$$

遥感信息模型建立的首要任务是根据量纲关系将土壤盐渍化因素有机地组织起来.选取国际上通用的力学单位制 MKS 单位制,对量纲引进麦克斯韦符号 a ,各量的量纲见表 2.

表 2 遥感信息模型中各变量的单位及其量纲的麦克斯韦表示

Table 2 Units and dimensions of variables in the form of Maxwell for remote sensing information model								
$P/(mm \cdot a^{-1})$	$E/(mm \cdot a^{-1})$	G_d/m	$G_m/(g \cdot L^{-1})$	α_{NDVI}	$S_a/(kg \cdot m^{-3})$	$S_d(^{\circ})$	C_d/m	$S_d(^{\circ})$
L^1	L^1	L^1	L^{-3}	L^0	L^{-3}	L^0	L^1	L^0
M^0	M^0	M^0	M^1	M^0	M^1	M^0	M^0	M^0
T^{-1}	T^{-1}	T^0	T^0	T^0	T^0	T^0	T^0	T^0

共有 8 个独立变量,包括 3 个不同的物理量纲,即长度 L 、质量 M 、时间 T ,选取降水强度 P 、地下水埋深 G_d 和地下水矿化度 G_m 为基本变量.

根据白金汉定理,共可以找到 6 组相似准则,即

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \tag{10}$$

其中 6 个 π 数为 $\pi_1 = P^{\alpha_1} G_d^{\beta_1} G_m^{\gamma_1} S_s$, $\pi_2 = \alpha_{NDVI}$, $\pi_3 = P^{\alpha_2} G_d^{\beta_2} G_m^{\gamma_2} E$, $\pi_4 = S_a$, $\pi_5 = P^{\alpha_3} G_d^{\beta_3} G_m^{\gamma_3} C_d$, $\pi_6 = S_d$. 根据 Π 定理得出量纲指数:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

根据式(10)(11)找到的相似准则,可得到土壤盐渍化遥感信息模型的一般式为

$$S_s = a_0 \left(\frac{E}{P}\right)^{a_1} \left(\frac{C_d}{G_d}\right)^{a_2} S_a^{a_3} \alpha_{NDVI}^{a_4} S_d^{a_5} G_m \tag{12}$$

4 实例研究

通过遥感信息模型建立区域盐渍化影响因子和积盐量之间的模型关系式,基于GIS综合评价平台,以位于疏勒河流域内的双塔灌区为模型试验区,选择地理位置相邻、自然条件类似的昌马和花海灌区作为模型验证区,建立定量评价关系式,预测盐渍化发展进程。

利用2000年6月双塔灌区土壤含盐量、蒸发和降水、地下水埋深、地下水矿化度、黏土层顶板埋深数据,插值得到全区数据,并将矢量数据栅格化,对应DSM,DEM,DPM,DDM,DMM,DCM;在MODIS(选取无云较好图像)提取同时段归一化植被指数数据,形成DNM;根据地面高程模型提取坡度、坡角生成DAM,DLM,将9组数据统一重采样为250 m×250 m的网格,形成空间网格数据组。

对土壤盐渍化遥感信息模型的一般式(12)两边取对数,将模型转换为多元线性方程:

$$\lg S_s - \lg G_m = \lg a_0 + a_1(\lg E - \lg P) + a_2(\lg C_d - \lg G_d) + a_3 \lg S_a + a_4 \lg \alpha_{NDVI} + a_5 \lg S_d \quad (13)$$

令 $Y = \lg S_s - \lg G_m$ $X_1 = \lg E - \lg P$ $X_2 = \lg C_d - \lg G_d$ $X_3 = \lg S_a$ $X_4 = \lg \alpha_{NDVI}$ $X_5 = \lg S_d$

则 $Y = \lg a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5$

由式(13)得到地理系数和地理指数 $a_0 \sim a_5$ 的方程:

$$\begin{cases} L_{11} a_1 + L_{12} a_2 + L_{13} a_3 + L_{14} a_4 + L_{15} a_5 = L_{1y} \\ L_{21} a_1 + L_{22} a_2 + L_{23} a_3 + L_{24} a_4 + L_{25} a_5 = L_{2y} \\ L_{31} a_1 + L_{32} a_2 + L_{33} a_3 + L_{34} a_4 + L_{35} a_5 = L_{3y} \\ L_{41} a_1 + L_{42} a_2 + L_{43} a_3 + L_{44} a_4 + L_{45} a_5 = L_{4y} \\ L_{51} a_1 + L_{52} a_2 + L_{53} a_3 + L_{54} a_4 + L_{55} a_5 = L_{5y} \end{cases} \quad (14)$$

对于 mn 个像元数据有:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X_{ij} \quad \bar{Y} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k Y_j \quad (k = mn, i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (15)$$

则 $a_0 = \bar{Y} - \sum_{i=1}^5 a_i \bar{X}_i$ (16)

由式(15)(16)得到方程(14)系数为

$$L_{ij} = \sum_{s=1}^k (X_{si} - \bar{X}_i)(X_{sj} - \bar{X}_j) \quad L_{iy} = \sum_{s=1}^k (X_{si} - \bar{X}_i)(Y_s - \bar{Y}) \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (17)$$

对数字空间数据进行栅格间运算,得到6组无量纲方程变量组 $Y, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ 。根据图像同名点进行图像运算,求出地理系数和地理指数: $a_0 = 16.292, a_1 = 0.365, a_2 = 0.493, a_3 = -0.866, a_4 = -0.117, a_5 = 0.024$ 。由此得到盐渍化遥感信息模型表达式:

$$S_s = S_c \left(\frac{E}{P} \right)^{0.365} \left(\frac{C_d}{G_d} \right)^{0.493} S_a^{-0.866} \alpha_{NDVI}^{-0.117} S_d^{0.024} G_m \quad (18)$$

式中 $S_c = 16.292$, 定义为区域土壤盐渍化常量。

将模型代入昌马灌区和花海灌区正演计算,结果显示,含盐量误差小于10%的网格分别占两灌区计算网格的82.6%和80.3%,基本满足要求。在获取研究年相应数据后进行评价,考虑在结合地下水系统模型对地下水动态预报的条件下,对盐渍化影响因子合理调整,预测研究区未来年份同期盐渍化发展趋势。

在盐渍化影响因子中,变化较大的是区域水文地质因素,即地下水矿化度和地下水埋深,由地下水动态模型得到。根据近30a的气象观测资料,区域蒸发量相对降水量有一定的增加,区域同期最大蒸降比由45.3增加到51.6,平均每年约增长0.2;坡度、坡角及归一化植被指数在本次预测中保持不变。以10a为一个预测时段,结果(图2)表明:双塔盆地土壤总体盐渍化面积基本不变,现状非盐渍土类型略有增加,同时轻盐土面积明显减少,特重盐土减弱为中、重盐土类型。

5 结 语

常用的盐渍化经验模型是定性的,是建立在经验判断和分析基础上简单的函数或者回归方程。它对过程或现象缺乏机理的认识,土壤盐渍化遥感信息模型的实质是基于物理量纲分析及GIS的土壤盐渍化多因子

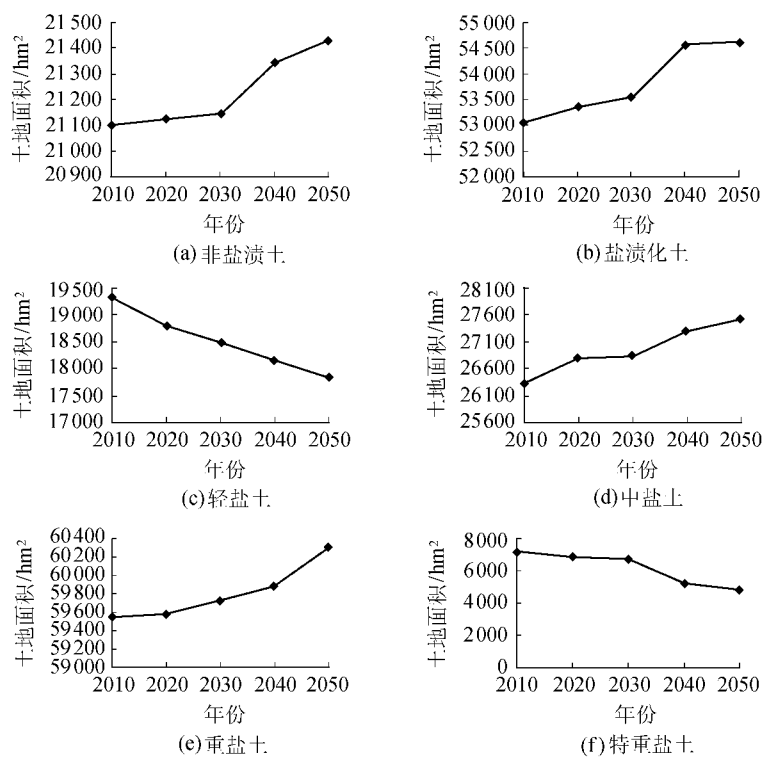


图 2 预测期双塔盆地土壤盐渍化变化趋势

Fig. 2 Trend of soil salinization in Shuangta Basin during prediction period

综合评价和预测模型,其与地理、数学模型相结合,以影像化的地理信息为主要数据源,有助于土壤盐渍化区域定量指标的研究。

参考文献：

[1] 马蔼乃. 遥感信息模型[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.

[2] 李永军, 彭苏平, 陈余道, 等. 漓江桂林市区段水环境自净容量地理信息模型探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 596-599. (LI Yong-jun, PENG Su-ping, CHENG Yu-dao, et al. Water environment self-purification capacity geography information model (GIM) in Guilin Section of Lijiang River[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 596-599. (in Chinese))

[3] 马蔼乃. 地理遥感信息模型与地理数学[J]. 测绘科学, 2000, 25(2): 10-14. (MA Ai-nai. Remote sensing information models of geography and geographical mathematics[J]. Developments in Surveying and Mapping, 2000, 25(2): 10-14. (in Chinese))

[4] 邓国红, 贺建民, 何怀波, 等. 量纲分析理论在《材料力学》中的应用[J]. 重庆工业管理学院学报, 1998, 12(1): 1-5. (DENG Guo-hong, HE Jian-ming, HE Huai-bo, et al. The application of dimensional analysis theory in mechanics of materials[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology Management, 1998, 12(1): 1-5. (in Chinese))

[5] 徐婕, 詹士昌. 量纲分析的基础及其应用研究[J]. 科技通报, 2004, 20(1): 51-54. (XU Jie, ZHAN Shi-chang. Research on the basis and application of dimensional analysis[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(1): 51-54. (in Chinese))

[6] 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[7] 陈立文, 孙宝铮, 姜林奇. 对多指标综合评价问题的探讨[J]. 工业技术经济, 1995, 14(1): 45-46. (CHEN Li-wen, SUN Bao-zheng, JIANG Lin-qi. Discussion on multi-index comprehensive evaluation method[J]. Industrial Technology and Economy, 1995, 14(1): 45-46. (in Chinese))

[8] 李纪人. 遥感和 GIS 在干旱和半干旱地区水资源管理中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 1-4. (LI Ji-ren. Application of remote sensing and GIS to water resources management in arid and semi-arid regions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(5): 1-4. (in Chinese))

[9] 陈隆亨, 曲光耀. 河西地区水土资源及其开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[10] 李麒麟, 梁明宏, 王云斌, 等. 疏勒河上游地区土壤盐渍化现状与综合治理分析[J]. 西北地质, 2004, 37(1): 81-85. (LI Qi-lin, LIANG Ming-hong, WANG Yun-bin, et al. Present situation and comprehensive countermeasures of salinized soil of the upper reach of Shule river[J]. Northwestern Geology, 2004, 37(1): 81-85. (in Chinese))

- [11] 孙涛, 潘世兵, 李纪人, 等. 疏勒河流域水土资源开发及其环境效应分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 313-317. (SUN Tao, PAN Shi-bing, LI Ji-ren et al. Analysis on the exploitation of water and land resources and its environmental effects in the Shule River watershed[J]. Arid Zone Research, 2004, 21(4): 313-317. (in Chinese))
- [12] 卜秋霞. 疏勒河项目区盐碱地的形成及改良利用[J]. 甘肃农业大学学报, 2000, 35(3): 301-306. (BU Qiu-xia. The formation and exploitation of the saline-alkali soils in the Shule River Project zone[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2000, 35(3): 301-306. (in Chinese))

Remote sensing information model of soil salinization in northwestern arid area of China

SUN Tao¹, LI Ji-ren^{1,2}, PAN Shi-bing¹

(1. Remote Sensing Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
2. Digital Basin Center, Institute of Digital China, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Combined with the researches on factors for the soil salinization in northwestern arid area of China, a remote sensing information model of soil salinization was established based on the physical factors analysis, the dimensional analysis and the II theorem. The general expression of the remote sensing information model in typical study area was deduced. The influences of combination of various factors on the formation and development of soil salinization were studied. The model was applied in Shuangta Basin in Shule River watershed, and the trend of soil salinization in this area in future 50 years was predicted. The results show that the total area of salinized soil in Shuangta Basin almost have little change, the non-salinization soil has a slight increase, the lightly-salinized soil obviously decreases and the extremely-salinized soil changes to the mid-salinized soil or heavily-salinized soil. The remote sensing information model can reflect the regional situation of soil salinization to some extent and can be employed to quantitatively evaluate the influences of soil salinization.

Key words: soil salinization; dimensional analysis; II theorem; remote sensing information model; Shule River