

水体叶绿素遥感反演中的多尺度分析

潘邦龙 (安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽合肥 230601)

摘要 水体遥感影像提取污染物信息普遍存在着尺度效应问题, 选择合适的空间分辨率影像能够准确地表征水域污染的空间分布状况。充分利用水体空间尺度信息, 研究水色遥感的尺度问题, 有利于提升湖泊水体遥感反演模型的应用能力。以巢湖水域 HJ-1A 卫星 HSI 高光谱和 CCD 多光谱遥感数据为例, 以 Matlab 为平台, 采用基于离散小波多尺度变换分析方法, 生成多光谱尺度和空间尺度影像, 然后利用水体污染物的定量遥感反演方法, 获取湖面水体叶绿素多尺度空间分布浓度, 并利用水面同步实测数据对反演结果进行验证。通过结果比较, 确定 100 m 分辨率的 HSI 高光谱数据为较优分析空间尺度。

关键词 水体污染物; 遥感图像; 多尺度; 小波变换

中图分类号 S126; TP791 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)12-03681-03

Multi-scale Analysis of Chlorophyll Inversion by Remote Sensing

PAN Bang-long (Environment and Energy Engineering Department, Anhui University of Architecture, Hefei, Anhui 230601)

Abstract Scale effect exists generally in water pollution information extraction from remote sensing image. The appropriate spatial resolution image can accurately characterize spatial distribution of water pollution. By making full use of the information of water spatial scale, solution on scale change of water color remote sensing is beneficial to improve the application ability of remote sensing inversion model of lake. Taking Chao-hu as an example, the paper applies HJ-1A HSI hyperspectral and CCD multi-spectral remote sensing data to build multi-spectral and spatial scales of image by discrete wavelet multiscale transform on the platform of Matlab, and then obtain the spatial distribution of chlorophyll concentration by the quantitative remote sensing inversion method of water pollutants, and finally verify the inversion results using water surface synchronous measurement data. By comparing the results, the 100 m resolution of HSI hyperspectral data is the better spatial scale of analysis.

Key words Water pollution; Remote sensing image; Multi-scale; Wavelet transform

随着遥感技术的发展, 利用卫星遥感数据对湖泊水质展开大规模监测, 特别是现代遥感的高空间和高光谱分辨率影像在湖泊水质遥感监测中具有监测范围广、数据更新快、运行成本低的优势。然而, 空间分辨率对于水体遥感信息提取精度的影响存在着两重性: 高空间分辨率减少了地类边缘的混合像元, 但地物内部的光谱变异复杂; 反之, 高光谱分辨率能够较好地表达地物特征, 但像元内混合地物复杂多变^[1]。因此, 选择最优空间尺度对于准确分析水体污染物的空间分布具有重要的意义。

目前, 国内外许多学者都对水体污染物含量进行相关研究。在国内, 唐军武等提出通过多波段的光谱反射比值, 可以导出水体固有光学参数吸收系数 a 和后向散射系数 b , 线性方程组再由上述固有光学参数与叶绿素 a 浓度的关系建立, 然后解出叶绿素 a 浓度的值^[2]; 国外从 20 世纪 70 年代开始就针对多光谱传感系统 (MSS) 的 4 个波段进行湖泊水质遥感研究。目前, 人们已经应用卫星遥感数据研究水体组分如透明度、Chl- a 、溶解性有机物、悬浮物、温度等的分布和变化。但是遥感影像在反映空间格局与过程中对尺度具有依赖性, 即对于不同空间尺度、光谱尺度的遥感影像数据, 经建模反演等技术手段最终得到研究区污染程度或范围时, 会产生部分差异。研究表明, 遥感影像的提取精度取决于混合像元的数量和类别边缘光谱变异的复杂程度两个主要因素。当影像的空间分辨率提高时, 处于不同类别边缘的混合像元数目将会变少, 分类精度随之提高; 但由于空间分辨率的提

高, 也导致相同地物内部光谱变异增大, 分类精度会降低^[3]。

小波多尺度分析为空间地物多尺度分割和最优空间尺度的选择提供了很好的解决方法。小波分析具有同时用多尺度对空间格局进行分析的能力, 也能将格局、尺度与具体空间位置明确地表示出来, 其不要求数据在研究的空间范围内具有平稳性, 而自然界存在的现象都是非平稳的, 因此小波变换具有处理一般数据的功能^[2]。为此, 笔者以 Matlab 为平台, 采用基于离散小波多尺度变换分析的 Mallat 分解算法, 生成多空间尺度和多光谱尺度影像, 然后利用水体污染物的定量反演方法, 获取湖面水体叶绿素多尺度空间分布浓度, 为最优空间尺度影像的选取提供依据。

1 分析方法

1.1 小波多尺度分析方法 小波变换是法国工程师于 1974 年提出的介于函数时间域和频率域间的一种表示方法, 该方法在空间域和频率域具有良好的局部化性质, 可以在任意尺度函数中分析提取出多尺度空间图像基本局部细节特征。该研究采用 Mallat 算法为小波多尺度分解运算方法^[4]。

设 $f(t) \in L^2(R)$, 并假定已得到 $f(t)$ 在 2^{-j} 分辨率下的粗糙像 $A_j f \in V_j \cdot \{V_j\}_{j \in Z}$, 构成 $L^2(R)$ 的多分辨率分析, 从而有 $V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}$, 即:

$$A_j f = A_{j+1} f + D_{j+1} f \quad (1)$$

式中, $A_j f = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t)$, $D_j f = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t)$ 。

于是:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j+1,k} \varphi_{j+1,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_{j+1,k} \varphi_{j+1,k}(t) \quad (2)$$

由尺度函数的双尺度方程可得:

$$\varphi_{j+1,m}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k-2m) \varphi_{j,k}(t)$$

基金项目 国家自然科学基金项目 (4101232); 安徽高校省级自然科学基金项目 (KJ2013B053)。

作者简介 潘邦龙 (1976-), 男, 安徽合肥人, 讲师, 博士, 从事水环境遥感研究。

收稿日期 2014-04-05

由尺度函数正交性可得:

$$\langle \varphi_{j+1,m}, \varphi_{j,k} \rangle = h(k-2m) \quad (3)$$

同理,由小波函数的双尺度方程可得:

$$\langle \Psi_{j+1,m}, \varphi_{j,k} \rangle = g(k-2m) \quad (4)$$

由式(2)、(3)和(4)可得:

$$C_{j+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} h * (k-2m) \quad (5)$$

$$D_{j+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} g * (k-2m) \quad (6)$$

$$C_{j,k} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(k-2m) C_{j+1,m} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(k-2m) D_{j+1,m} \quad (7)$$

引入无穷矩阵 $H = [H_{m,k}]_{m,k=-\infty}^{\infty}$, $G = [G_{m,k}]_{m,k=-\infty}^{\infty}$, 其中 $H_{m,k} = h * (k-2m)$, $G_{m,k} = g * (k-2m)$, 则式(5)、(6)和(7)可分别表示为:

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j \\ D_{j+1} = GC_j \end{cases} \quad j=0,1,\dots,J \quad (8)$$

$$C_j = H^* C_{j+1} + G^* D_{j+1}, j=J, J-1, \dots, 1, 0 \quad (9)$$

式中, H^* 、 G^* 分别是 H 和 G 的共轭转置矩阵, 式(8)为 Mallat 一维分解算法, 式(9)为 Mallat 一维重构算法^[5]。

1.2 水体污染物的定量反演方法 半经验方法是将已知的水质变量光谱特征与统计分析模型(或其他数学模型)相结合, 选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水质变量的方法。这种方法是目前最常用的定量分析方法之一, 不但简单实用而且具有一定的物理意义, 国内外很多学者都利用过这种方法监测湖泊、水库的水质变量如叶绿素、悬浮物、富营养化指数等, 得到较高的反演精度。常用的方法有线性回归、对数转换线性回归、多项式回归、逐步多元线性回归、贝叶斯分析、主成分分析等。该研究拟采用半经验法中的线性回归方法对小波多尺度影像进行建模与反演, 以获取影像最佳空间分析尺度^[6]。

2 实例分析

2.1 影像数据和水面实测数据 研究数据采用的是 HJ-1A 卫星 HSI 高光谱和 CCD 多光谱影像, 成像时间为 2009 年 6 月 13 日, 该天气晴朗, 能见度高, 湖面气象状况良好。由于获取的数据为二级影像产品, 需要做几何精校正和大气校正。几何校正采用 ArcGIS 软件支持下以 1:10 000 地形图作为参考, 利用多项式几何模型校正和最邻近重采样方法, 实现校正精度 $RMSE$ 小于 1 个像素。大气校正采用 6S 软件实现参

与计算的部分波段数据的大气校正, 并计算出水体遥感反射率。

水面测量试验在巢湖水域同步展开, 共选取了 24 个样点。水面光谱测量使用 ASD 便携式野外光谱仪 FieldSpec (波长范围为 350~2 500 nm), 采用“水面以上法”测量水面光谱。水面采集的水样置于 10% HCl 和去离子水洗净的塑料桶中, 并用 GPS 记录样点经纬度坐标。取样后的水质参数浓度由室内试验分析获得样点叶绿素 a 浓度数据。由于在数据处理时发现 11 号点位数数据异常, 去除后剩余的 23 个点用于建模和检验。具体采样点平面分布如图 1 所示。



图 1 巢湖采样点

2.2 小波分析算法实现 将 $0-P_i$ 定义为空间 V_0 , 经过一级分解之后 V_0 被分成 $0-P_i/2$ 的低频子空间 V_1 和 $P_i/2-P_i$ 的高频子空间 W_1 , 然后一直分下去, 得到 $V_j + W_j + \dots + W_2 + W_1$ 。因为 V_j 和 W_j 是正交的空间, 且各 W 子空间也是相互正交的, 所以分解得到相互不包含的多个频域区间, 称为多分辨率分析, 即多尺度分析^[5-6]。对一幅图像进行小波分解, 得到低频和对应的高频部分, 该研究中利用 bior 3.7 小波基对原始图像进行小波变换, 采用 wavedec2 函数实现对图像的二维分解, 对高频系数的提取则采用 detcoef2 函数, 而对低频信号系数提取则采用函数 appcoef2; wrcoef2 函数实现利用 bior3.7 小波基对低频分量的水平方向、垂直方向、斜线方向以及高频分量的重构; wcodemat 函数实现对数据矩阵进行伪彩色编码; waverec2 函数实现对二维信号的多层小波重构, 即小波变换的逆变换, 最终利用 imwrite 函数将图像写入文件, 并保存。结果如图 2 所示。

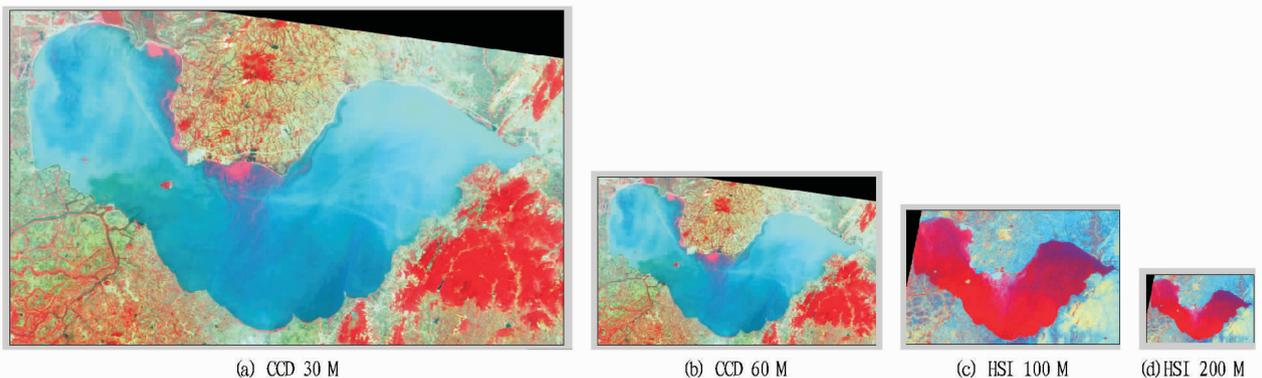


图 2 Matlab 小波分析算法运行结果

2.3 污染物浓度反演 该研究选用叶绿素为水体污染物的典型代表指标参数进行研究。通过前人对巢湖水体光谱特性已有的研究发现,水体光谱反射率与叶绿素 a 的最大相关性位于 680 和 705 nm 附近,相应的卫星影像波段为叶绿素反演相关度最高的波段^[7-8]。鉴于此,笔者利用 HJ-1A 卫星 CCD 数据的 B3、B4 波段和 HSI 的 B79、B72 波段反射率,结合采样点实测叶绿素浓度,利用最小二乘法进行线性拟合,得到模型如下:

$$C = 299.83 * B4/B3 + 58.53 \quad (10)$$

$$C = 361.95 * B79/B72 - 249.01 \quad (11)$$

2.4 反演结果 从表 1、2 和图 3 结果来看,不同遥感影像经小波变换后的叶绿素反演值与实际误差较小,表明反演结果具有一定的精度;经过波段比值分析,利用反射率比值与叶绿素浓度的线性模型反演,结果表明,60 m 分辨率的小波变换后 HJ-1A 卫星 CCD 影像的叶绿素反演值与实测值的相关系数 R^2 为 0.784, $RMSE$ 为 1.47 $\mu\text{g/L}$, 30 m 原始影像的相关系数 R^2 为 0.763, $RMSE$ 为 2.85 $\mu\text{g/L}$, 60 m 分辨率的影像反演的结果较优;而 HSI 100 m 原始影像反演检验的相关系数 R^2 为 0.819, $RMSE$ 为 1.02 $\mu\text{g/L}$, 小波变换后相关系数

R^2 为 0.799, $RMSE$ 为 3.12 $\mu\text{g/L}$, 100 m 原始影像优于小波变换后的 200 m 影像。

表 1 多尺度反演叶绿素浓度比较

采样点	实测样点浓度	$\mu\text{g/L}$			
		CCD 30 m 反演浓度	CCD 小波变换 60 m 反演浓度	HSI 100 m 反演浓度	HSI 小波变换 200 m 反演浓度
1	67.65	75.59	60.25	75.29	73.34
2	123.76	110.19	115.37	103.53	107.26
3	169.18	142.28	142.28	175.12	174.01
4	182.65	145.63	153.27	189.67	188.25
5	95.19	126.04	121.31	90.13	89.27
6	55.17	60.69	59.27	47.06	47.28
7	53.42	71.26	65.38	46.70	47.36
8	65.56	69.03	67.25	68.42	67.25
9	89.76	68.83	70.11	68.78	67.38
10	60.47	73.41	71.47	53.94	51.34
11	114.21	134.28	125.21	130.78	129.25
12	89.43	68.74	100.43	74.80	75.62
13	38.65	57.35	49.65	34.03	35.38
14	47.22	50.03	58.22	77.83	72.28
15	40.14	49.24	51.14	53.58	50.36

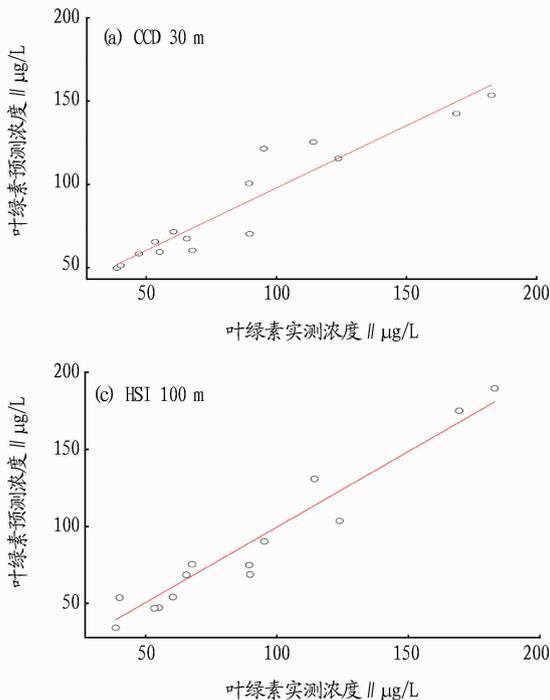


图 3 叶绿素浓度反演值与实测值检验比较

表 2 多尺度反演叶绿素浓度估算精度比较

反演类型	相关系数 R^2	均方根误差 $RMSE$
CCD 30 m	0.763	2.85
CCD 小波变换 60 m	0.784	1.47
HSI 100 m	0.819	1.02
HSI 小波变换 200 m	0.799	3.12

3 结论

对于不同尺度遥感影像,由于其自身特点,会对水体污染物参数反演结果产生不同影响。该研究以 HJ-1A 卫星

HSI 影像和 CCD 影像为研究对象,采用常规半经验线性模型建立各自反射率与叶绿素浓度间的关系,分别对原始影像的相关波段和经小波变换过后的影像图进行反演比较,在采用相同的反演模型下,经小波变换后的反演结果与实地测量值有一定的差异,表明遥感影像的空间尺度和光谱尺度对反演结果的敏感性。通过对于两种不同传感器的影像数据分析, HJ-1A 的 HSI 100 m 空间尺度的高光谱影像反演效果优于其他分辨率的影像。然而,该研究虽然对水体遥感的空间尺度

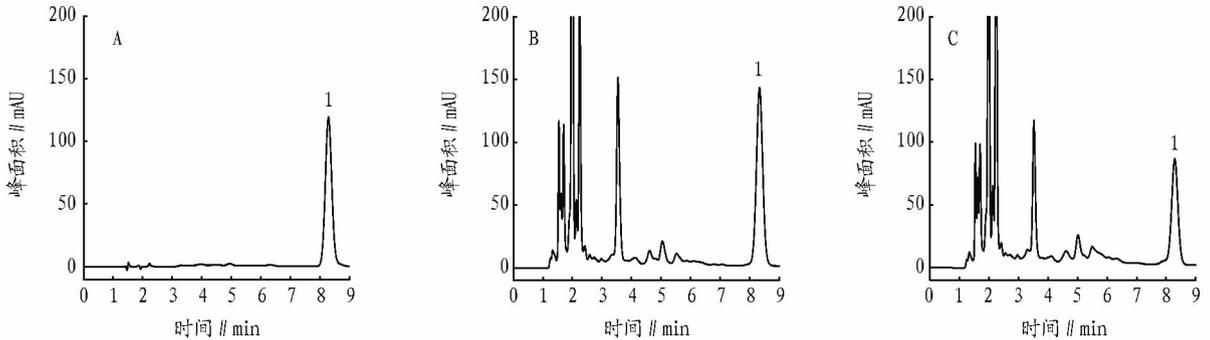
(下转第 3715 页)

10 μl 进样,依上述色谱条件测定,重复进样 5 次,测定 EGCG 峰面积, RSD 为 0.38%,结果表明,仪器具有较好的精密度。

2.5 稳定性试验 分别取“1.2.3”项制备的大茶树青叶、小茶树青叶 2 种供试样品溶液 10 μl ,于 0、2、4、6、8、10 h 进样测定,各重复进样 6 次,测定目标组分的含量,以考察供试品溶液的稳定性,10 h 大茶树茶和小茶树样品 EGCG 组分

RSD 分别为 2.8%、3.1%。结果表明,供试品溶液在 10 h 内基本稳定。

2.6 加样回收试验 精密称取已知含量的茶样品 6 份,分别精密加入一定量 EGCG 对照品,按供试品溶液制备方法制备样品溶液,依上述色谱条件测定含量。结果显示,该方法具有较高的准确度(表 1)。



注:A. 对照品;B. 大茶树;C. 小茶树;1. EGCG。

图 1 对照品与样品 HPLC 色谱

表 1 回收率试验结果

样品编号	样品含量 / mg	加入量 / mg	测得量 / mg	回收率 / %	平均回收率 / %	RSD / %
1	0.933	0.8	1.733	100.00	97.61	6.16
2	0.933	0.8	1.627	86.75		
3	0.933	0.9	1.813	97.78		
4	0.933	0.9	1.801	96.44		
5	0.933	1.0	1.988	105.50		
6	0.933	1.0	1.925	99.20		

2.7 样品中 EGCG 含量的测定 按照“1.2.3”项制备 3 个大茶树和 3 个小茶树西湖龙井茶叶供试品溶液,按“1.2.1”项色谱条件进样测定,每样重复进样 3 次,求峰面积均值,按外标法计算其含量。大茶树中 EGCG 的含量为:14.151 mg/g (RSD 0.56%), 15.534 mg/g (RSD 0.66%), 13.526 mg/g (RSD 0.75%), 平均含量 14.404 mg/g;小茶树中 EGCG 的含量为:8.645 mg/g (RSD 0.56%), 9.326 mg/g (RSD 0.59%), 8.957 mg/g (RSD 0.63%), 平均含量 8.976 mg/g。

3 结论

采用 HPLC-DAD 法对大茶树和小茶树的西湖龙井茶中的 EGCG 进行了含量分析,试验结果表明,大茶树西湖龙井茶青叶中 EGCG 平均含量为 14.404 mg/g,含量较高;小茶树西湖龙井茶青叶中 EGCG 平均含量为 8.976 mg/g,比大茶树含量低。该试验为人们选择茶叶原料提供参考,为企业对原料等级划分提供了试验依据。该测定茶中 EGCG 含量的方法操作简单、重现性好、分析结果准确可靠,可用于原料茶的质量控制。

参考文献

(上接第 3683 页)

和光谱尺度有初步的探索,但还未考虑到时间分辨率和复杂的水环境等因素的影响,尺度对模型的影响还有待于进一步研究^[9-10]。

参考文献

- [1] 陈军,王伟财,王保军,等. 悬浮泥沙浓度分布方差与尺度修正——八邻域算法[J]. 红外与毫米波学报,2010,29(6):440-444.
- [2] 万华伟,王锦地. 植被波谱空间尺度效应及尺度转换方法初步研究[J]. 遥感学报,2008,12(4):538-545.
- [3] 马荣华,唐军武,段洪涛,等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学,2009,21(2):143-158.
- [4] 张瑾,陈向东. 小波分析在遥感图像增强中的应用及 MATLAB 实现[J]. 半导体光电,2005,26(3):155-157.

- [1] 张龙,王飞娟,潘家荣,等. 近红外光谱和模式识别技术在西湖龙井与浙江龙井茶叶鉴别中的应用[J]. 红外,2012,33(3):44-48.
- [2] 卢涛,兰先秋,朱斌,等. 不同茶多酚中儿茶素的测定及柱层析法提取 EGCG 的比较[J]. 化工进展,2008,27(5):746-752.
- [3] 王霞,高丽娟,林炳昌. 表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)的分离与制备[J]. 食品科学,2005,26(9):242-245.
- [4] 梁晓岚,陈春林. 茶多酚的研究进展[J]. 茶叶科学技术,1994(1):6-8.
- [5] 张瑜,邹国林,彭少君. 表没食子儿茶素没食子酸酯研究进展[J]. 氨基酸和生物资源,1998,20(4):51-54.
- [5] 王富荣. 基于提升小波变换的图像压缩研究[D]. 苏州:苏州大学,2006.
- [6] KIM G, BARROS A P. Downscaling of remotely sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data[J]. Remote Sensing of Environment,2002,83(3):400-413.
- [7] 朱利,姚延娟,吴传庆,等. 基于环境一号卫星的内陆水体水质多光谱遥感监测[J]. 地理与地理信息科学,2010(3):143-158.
- [8] 王桥,杨煜,吴传庆. 环境减灾-1A 卫星超光谱数据反演叶绿素 a 浓度的模型研究[J]. 航天器工程,2009,18(6):143-158.
- [9] ATKINSON P M, CURRAN P J. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1997,63(12):1345-1351.
- [10] ATKINSON P M, TATE N J. Spatial scale problems and geostatistical solutions: A review [J]. Professional Geographer,2000,52(4):607-623.