一、项目名称

地表要素的高精度曲面建模方法

二、提名单位及提名意见

提名单位：中国科学院

提名意见：《地表要素的高精度曲面建模方法》是中国科学院地理资源研究所资源环境模型与系统模拟研究核心团队围绕地表要素格局过程建模中的误差问题、多尺度问题和大数据问题，经过 20 年研发而形成的原创性成果。取得的重大突破性成果包括：

1）针对经典曲面建模方法存在的理论缺陷，将地表要素的格网化描述抽象为数学“曲面”，并通过系统论、曲面论和优化控制论的有机结合，开创性地建立了一个集成宏观格局信息和微观过程信息的高精度曲面建模（HASM）方法。有效地解决了半个世纪以来困扰曲面建模的误差问题和多尺度问题，形成了一套完整的地表要素模拟分析方法。

2）以 HASM 为理论基础，建立了数字地面模型构建、气候要素插值、陆地生态系统变化模拟、土壤属性模拟、人口分布动态模拟等系列高精度曲面模拟方法，并实现了区域、全国、全球等多个尺度上的陆表要素变化趋势与情景的模拟分析。

3）发展了土地利用信息学的方法体系，定量刻画了中国现代土地利用变化的复杂时空过程及其驱动机制，揭示了中国农田生态系统自上世纪后期以来重心逐渐向低温干旱区移动的趋势及其对中国粮食安全的影响。

该研究成果不仅在国际地学领域的权威杂志发表，而且受到了国内外同行的广泛关注和高度评价；高精度曲面建模（HASM）方法被国际《生态学大百科全书》和国际《环境管理大百科全书》收录，并被命名为 YUE-HASM 方法；同时，有关理论已被联合国 IPBES 全球评估报告采用，并纳入 IPBES 情景分析与建模方法的指导性文件。该成果对推动我国地理信息科学及相关领域理论与方法体系的完善和发展具有重大科学意义。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

三、项目简介：

在地球表层系统模拟过程中，如何采用理论完备的方法实现地表宏观格局与微观过程的有机结合，并解决误差问题、多尺度问题和大内存需求问题，是地球

信息科学研究面临的主要挑战。该项目紧扣上述问题，在 2000-2015 年期间，取得如下三方面的重要成果：

3.1. 创立和发展了的高精度高速度曲面建模理论与方法

针对地球表层系统模拟过程中，输入信息不完备（仅使用外蕴信息或仅使用内蕴信息）、没有考虑宏观格局与微观过程有机结合等科学问题，在全面总结分析了经典曲面建模方法的理论缺陷的基础上，将地表要素空间格局的格网化描述抽象为数学“曲面”，并通过系统论、曲面论和优化控制论的有机结合，开创性地建立了能够集成宏观信息和微观信息的高精度高速度曲面建模（HASM）方法，形成了相对完整的地表要素模拟分析理论和方法体系，有效地解决了半个世纪以来困扰曲面建模的误差问题和多尺度问题。同时，为了解决 HASM 运算速度慢和大内存需求问题，相继建立和发展了系列高效算法：1）选取适当迭代方法、构造演进问题序列，提高了 HASM 数值计算收敛速度；分析离散问题的特点，利用分而治之算法，实现了快速数值求解；2）发展了 HASM 共轭梯度法、多重网格法和平差计算方法，使得 HASM 运算速度和计算规模大幅度提高；3）发展了 HASM 适应算法，大幅消减了 HASM 计算成本，实现了 HASM 的全球快速计算能力；4）提出了通过 GPU 并行计算来加速 HASM 高效数值算法的高性能计算方法；通过对计算区域的逐次、分组计算，结合消息传递并行编程环境（MPI），建立了适合于 HASM 并行计算的进程映射机制，实现计算任务与执行进程的自动匹配及并行处理，解决了大数据处理的大内存需求问题和速度缓慢问题。

3.2. 建立和发展了一系列高精度地表要素模拟分析模型

以 HASM 为理论基础，发展了升尺度、降尺度、空间插值、数据融合和模型-数据同化算法、建立了数字地面模型构建方法、气候观测数据空间插值方法、全球气候模型降尺度方法、陆地生态系统空间分布变化模拟分析方法、土壤属性空间模拟分析方法、人口空间分布动态模拟方法、以及食物供给和碳储量等生态系统服务功能模拟分析方法，实现了区域、全国、全球等多个尺度上的地表要素历史变化趋势和情景的时空动态模拟分析。定量模拟并揭示了全国陆地生态系统的时空变化规律。

3.3. 建立和发展了土地利用信息学的方法体系

建立和发展了土地利用与生态背景组合遥感分类系统、多源遥感数据融合的

土地利用变化分类新方法、基于地理区划的地学/光谱参数多维遥感自动分类的土地利用变化信息提取方法、以多源数据融合为目标的“结构性栅格数据基准”等综合定量分类的方法体系。实现了中国现代土地利用变化过程的动态区划；刻画了中国现代土地利用变化的复杂时空过程，解决了土地利用时空变化过程规律研究中定量分析土地利用变化过程和变化格局两者之间耦合规律的难题，揭示了不同时空单元土地利用变化的驱动机制；发现了中国农田生态系统自上世纪后期以来重心逐渐向低温干旱区移动的趋势，揭示了这一趋势对中国粮食安全的影响。

该项目是对地表要素曲面建模模理论与方法体系的研究与深化，丰富和发展了地理信息科学内容，不仅为地表要素数据处理与分析奠定了理论基础，而且大大提高了资源环境领域专业模型的模拟精度和大数据处理能力。另外，高精度曲面建模（HASM）方法被国际《生态学大百科全书》和国际《环境管理大百科全书》收录，并被命名为 YUE-HASM 方法，有关理论已被联合国 IPBES 全球评估报告采用，并纳入 IPBES 情景分析与建模方法的指导性文件。8 篇代表性论著被引总次数 1687 次。其中，被 SCI 期刊论文他引 850 次，他引总次数为 1279 次。

四、客观评价

4.1. 关于“高精度曲面建模理论与方法”的客观评价

国际生态建模学会前主席 Sven Erik Joergensen 教授在国际期刊《Ecological Modelling》发表书评（附件 5-1），对代表性论著 1 评价：“误差问题和计算速度问题是地理信息系统和计算机辅助设计系统面临的两个主要挑战。这本专著研发的**高精度高速度曲面建模方法**为长期以来困扰地理信息系统和计算机辅助设计系统的**误差问题和运算速度慢问题提供了解决方案**”（Error problems and slow-computational-speed problems are the two critical challenges currently faced by Geographical Information Systems (GIS) and Computer-Aided Design Systems (CADS). High-accuracy and high-speed methods for surface modeling (HASM) developed in this book provide solutions to these problems that have long troubled GIS and CADS.）。

前国际生态学会主席 Wolfgang Haber 教授在《Journal of Geographical Sciences》发表书评（附件 5-2），对代表性论著 1 评价：“我确信，这本书的出版是**环境建模和环境科学**的一个**里程碑**，是**环境建模的杰作和基石**”（I am quite sure that this book will be a landmark in environmental modelling and science. The publication of the book is both a masterpiece and a cornerstone）。

4.2. **关于“系列高精度陆表要素模拟模型与方法”的引用与评价**

“生物多样性与生态系统服务政府间平台（IPBES）”关于生物多样性和生态系统服务情景模型方法评估报告的空间降尺度（Spatial downscaling）和跨尺度相互作用（Cross-scale interactions）中采用了岳天祥等人发展的方法（附件 5-3），并**纳入了 IPBES 情景分析与建模方法的指导性文件**（The fast-track assessment of methodologies for scenario analysis and modelling of biodiversity and ecosystem services is important for guiding the use of such methodologies in all work under the Platform to ensure the policy relevance of its deliverables. ）（附件 5-4）。

武汉大学地理信息系统教育部重点实验室杜清运研究团队在 PLOS One 上发表论文（代表性引文 2），引用代表性论著 2，评价：岳天祥等人为了提高数字地形模型（DTMs）精度，提出了基于曲面论的 DTM 构建插值的优化算法。（To improve the accuracy of DTMs, a large number of studies have focused on DTM construction for interpolations, such as IDW, SPLINE, KRIGING, optimization methods based on theorems of surfaces）。

克罗地亚萨格勒布大学 Bogunovic et al 在 Soil & Tillage Research 上发表论文（代表性引文 7），引用代表性论著 7，评价：插值方法是插值精度的关键，精度对比研究发现，**高精度曲面建模（HASM）方法是一个值得信赖的方法**，运用它能更好地进行土壤属性变量的空间分布评估。（The interpolation method is recognized as a key factor for interpolation accuracy. Comparison and accuracy of interpolation methods has been investigated in several studies. The reliability of the interpolation gives a better assessment of the spatial distribution of the variables.）

德国卡尔斯鲁厄应用科学大学 Lung et al.在 Applied Geography 上发表论文（代表性引文 6），引用代表性论著 6，评价：“为了更真实的反应人口分布，岳天祥等人发展了人口模拟的曲面插值方法，该方法能够将人口数据转换成规则的、连续的栅格数据，每一个栅格的数值用于表征栅格单元范围内的总人口数量”。（To address this problem, areal interpolation methods have been developed that transform population data into a regular, continuous grid (raster) in which each grid cell (pixel) is assigned a representative estimate of the total population for that particular cell…）

《Population and Environment》杂志主编 MacKellar L 教授在该杂志第 26 卷第 3 期（附件 5-5）的编者案中评价：“岳天祥等人发展的**人口曲面模拟方法是中**

尺度人口分布模拟分析的代表作”（The meso-scale of analysis is represented by the contribution of Yue et al. (“SMPD Scenarios of Spatial Distribution of Human Population in China”). ）。

日本爱媛大学 Zhang et al.在 Global Change Biology 上发表论文（代表性引文 5），直接引用代表性论著 5 中改进和拓展的 HLZ 生态系统及平均中心模型，模拟了内蒙古近 50 年来的生态系统分布、范围及 NPP 变化受气候变化的影响。（BT,TAP and PER at site (x, y) and in the t th year have the following formulations. The major applications were those concerned with central tendency, and especially the weight mean center of spatial distribution. The model is formulated as…）。

捷克科学院植物研究所 Dvorsky et al. 在 Scientific Reports 上发表论文（代表性引文 8），直接引用代表性论著 8 的研究结论，即青藏高原地区气温过去几十年具有显著增温现象，而且喜马拉雅山周边地区降水量具有显著增加，并基于这一结论对青藏高原地区维管植物生长的海拔高度上移的论证和分析。（Climate change in Ladakh, as well as the rest of the western Himalaya and the adjacent part of the Tibetan Plateau, includes undoubted rapid warming…）

4.3. 关于“土地利用变化信息学方法体系”的引用与评价

佐治亚理工学院 Zhou et al. 在美国国家科学院院刊《PNAS》上发表论文（代表性引文 3），直接引用代表论著 3 的结果，即过去 20 年中国耕地向城镇用地转换过程明显的结论（Although a substantial conversion from arable land into built-up areas was identified…）。

澳大利亚联邦科学与工业研究组织 Zhang et al.在 Global Change Biology 发表论文（代表性引文 4），直接引用代表性论著 4 获得的数据成果：耕地生态群落是仅次于草地和森林生态系统的第三大生态群落，耕地总面各在 2000 年达到了 140 万平方公里，近中国陆地地面积的 15%（The cropland biome covers the third largest area in China after grassland and forest biomes. The total area of cropland was 1.41 million km^2 in 2000, which is about 15% of the total land area of China.）。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 篇）

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	年卷页码 （xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间（年月日）	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	论文署名单位是否包含国外单位
1	Surface modeling: high accuracy and high speed methods / CRC Press / Yue TX	2011, 1-691	2011/04/01	岳天祥	岳天祥	岳天祥	6	10	否
2	A new method of surface modeling and its application to DEM construction / Geomorphology / Yue TX, Du ZP, Song DJ,	2007, 91: 161-172	2007/02/16	岳天祥	岳天祥	岳天祥，杜正平，宋敦江，龚云	25	33	否
3	Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000/Science China (Series D)- Earth Sciences/ Liu JY, Liu ML, Zhuang DF,	2003, 46(4): 373-384	2003/04/01	刘纪远	刘纪远	刘纪远，刘明亮，庄大方，张增祥，邓祥征	342	530	否
4	Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data/ Remote Sensing of Environment/Liu JY, Liu ML, Tian HQ, Zhuang DF, Zhang ZX,	2005, 98(4): 442-456	2005/10/30	刘纪远	刘纪远	刘纪远，刘明亮，庄大方，张增祥，张稳，唐先明，邓祥征	385	561	否

5	Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960/Global and Planetary Change/ Yue TX, Fan ZM, Liu JY	2005, 48: 287-302	2005/03/01	岳天祥	岳天祥	岳天祥，范泽孟，刘纪远	19	32	否
6	Surface modelling of human population distribution in China/ Ecological Modelling/ Yue TX, Wang YA, Liu JY, Chen SP, Qiu DS, Deng XZ, Liu ML, Tian YZ, Su BP	2005, 181: 461-478	2005/02/10	岳天祥	岳天祥	岳天祥，王英安，刘纪远，陈述彭，邱冬生，邓祥征，刘明亮，田永中，苏变萍	28	46	否
7	Surface modelling of soil pH/ Geoderma/ Shi WJ, Liu JY, Song YJ, Du ZP, Chen CF, Yue TX	2009, 150: 113-119	2009/02/25	史文娇	史文娇	史文娇，刘纪远，宋印军，杜正平，陈传法，岳天祥	27	41	否
8	Climate change trend in China, with improved accuracy/ Climatic Change/Yue TX, Zhao N, Ramsey D, Wang CL, Fan ZM, Chen CF, Lu YM, Li BL	2013, 120: 137-151	2013/09/01	岳天祥	岳天祥	岳天祥，赵　娜，王晨亮，范泽孟，陈传法，卢毅敏	18	26	否
合　计							850	1279	

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政/技术职务	工作单位/完成单位	对本项目技术创造性贡献
岳天祥	1	研究员	中国科学院地理科学与资源研究	项目主持人，提出研究总体思路和方案，实施并参加项目全过程。在本项目重要科学发现 1 和 2 中做出重要贡献，为 8 篇代表性论著中第 1、2、5、6、8 篇论著的第一作者，代表论文 7 的合作作者。理论创新如下：在国内外首先创立了高精度高速度曲面建模理论体系；提出了一系列基于 HASM 的陆表要素模拟分析新理论和新方法。
刘纪远	2	研究员	中国科学院地理科学与资源研究所	实施并参加项目全过程。在重要科学发现 2 和 3 中做出重要贡献，分别为第 3、4 篇代表性论文的第一作者，第 7 篇代表性论著第二作者和第 5、6 篇代表性论著第三作者。理论创新如下：在建立 LUCC 时空过程及其形成演化机理、以及 LUCC 及生态效应综合定量分析的方法体系的基础上，发展了 LUCC 信息学的方法体系。
范泽孟	3	副研究员	中国科学院地理科学与资源研究所	实施并参加项目重要过程。在重要科学发现2和3中做出重要贡献，为第5篇代表性论文第二作者，第8篇代表性论文第四作者。理论创新如下：提出了高精度曲面建模方法在陆地生态系统情景建模应用的研究思路和方案，发展了多尺度陆地生态系统情景的曲面建模分析方法，实现了气候区域、全国、全球等多个尺度陆地生态系统时空变化趋势及情景模拟。
史文娇	4	副研究员	中国科学院地理科学与资源研究所	实施并参加项目重要过程。在重要科学发现第 2 方面做出重要贡献，为第 7 篇代表性论著第一作者。理论创新如下：提出了高精度曲面建模方法在土壤领域应用的研究思路和方案，构建了土壤属性的高精度高速度曲面建模方法，有效提高了土壤属性空间模拟的准确性。
赵娜	5	副研究员	中国科学院地理科学与资源研究所	实施并参加项目重要过程。在重要科学发现第 2 方面做出重要贡献，为第 8 篇代表性论著第二作者。理论创新如下：发展了以高精度曲面建模（HASM）方法为基础的多尺度气候要素高精度空间模拟方法，大幅度提高了主要气候要素的空间模拟精度，解决了 HASM 运算过程的智能化问题。

七、完成人合作关系说明

完成人合作关系说明

本项目主要完成人岳天祥、刘纪远、范泽孟、史文娇、赵娜均为中国科学院地理科学与资源研究所资源环境模型与系统模拟研究核心团队成员，均为本项目的研究成果做出重要贡献。8 篇代表性论著的合作情况如下：

岳天祥、范泽孟、刘纪远共同合作完成代表性论著 5 的撰写和发表（Yue et al. Global and Planetray Change, 2005, 48:287-302）；岳天祥、刘纪远等共同合作完成代表性论著 6 的撰写和发表（Yue et al.，Ecological Modelling, 2005: 181,461-478）；史文娇、刘纪远、岳天祥等共同合作完成代表性论著 7 的撰写和发表（Shi et al., Geoderma， 2009,150:113-119）；岳天祥、赵娜、范泽孟等共同合作完成代表性论著 8 的撰写和发表(Yue et al., Climatic Change,2013,120:137-151)。除以上代表性论著外，该项目完成人之间还合作撰写和发表了大量的科研论文，而且目前仍然继续保持共同撰写科研论文和争取科研项目立项的密切合作关系。

第一完成人签名：岳天祥

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者（项目排名）	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	论文合著	岳天祥（1）范泽孟（3）刘纪远（2）	2002-2015	Changes of major terrestrial ecosystems in China since 1960	附件1-5代表性论文专著5	
2	论文合著	岳天祥（1）刘纪远（2）	2000-2015	Surface modelling of human population distribution in China	附件1-6代表性论文专著6	
3	论文合著	岳天祥（1）刘纪远（2）史文娇（4）	2006-2015	Surface modelling of soil pH	附件1-7代表性论文专著7	
4	论文合著	岳天祥（1）范泽孟（3）赵　娜（5）	2011-2015	Climate change trend in China, with improved accuracy	附件1-8代表性论文专著8	

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：岳天祥